

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DE DATOS DE PRECIPITACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL PROVENIENTES DE PLUVIÓMETROS Y UN RADAR METEOROLÓGICO EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO PAUTE.

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL

AUTOR:

Luis Ángel Salinas Orrego
C.I.: 0106067218

DIRECTOR:

Ing. Alex Manuel Áviles Añazco. PhD
C.I.: 0102247186

TUTOR:

Agrim. Daniela Elizabet Ballari. PhD
C.I.: 01751894716

CUENCA – ECUADOR

2017

RESUMEN

La estimación cuantitativa espacio temporal de la precipitación en una determinada área es de gran importancia para la modelación y manejo de los recursos hídricos; como lo es la gestión del agua para el consumo humano, la agricultura y la energía, mitigación de sequías, control de inundaciones, diseños viales y el seguimiento de fenómenos meteorológicos adversos, así como para otras muchas aplicaciones. El presente proyecto está enfocado en la evaluación del método de interpolación Inverso de la Distancia (IDW), usando, en un primer caso, únicamente información de pluviómetros y, en un segundo caso, la integración de imágenes de radar meteorológico con datos de pluviómetros aplicado a tres eventos de precipitación fuerte en tres resoluciones diferentes de pixel (100, 250 y 500 m). Los resultados muestran que el segundo caso es el óptimo para la estimación de la precipitación en lugares desprovistos de información pluviométrica, como lo es parte de la cuenca alta del río Paute. Además, el estudio establece la implementación de un código de programación, el cual permite evaluar las técnicas de interpolación mencionadas, de manera que llegue a convertirse en una guía para futuros análisis o investigaciones.

Palabras claves: IDW, pluviómetros, radar de precipitación, cuenca alta del río Paute.

ABSTRACT

The quantitative estimate temporal space of precipitation in a given area is of great importance as a tool for modelling and water resources management such as water for human consumption, agriculture and energy, mitigation of drought, control floods, road designs, the crops forecast and monitoring of adverse weather events as well as for many other applications. This project is focused on the evaluation of the effectiveness of interpolation method IDW (Inverse Distance Weight), using in a first case, only information of rain gauges and a second case integrating images of weather radar with rain gauge data applied to three strong events of precipitation in three different resolutions of pixel (100, 250 y 500 m). The results show that the second case as the optimal for estimating the average rainfall in places devoid of information from data collected by rain gauges and radar in the upper basin of the river Paute. This study establishes the implementation of a programming code, which allows to evaluate the above - mentioned interpolation techniques, so that you get to become guide for the future analyses or investigation.

Keywords: IDW, rain gauges, radar of precipitation, upper basin of the river Paute.



CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. Objetivos	14
1.1.1. Objetivo General	14
1.1.2. Objetivos Específicos	14
2. MARCO TEÓRICO	15
2.1. Observación de Datos de Precipitaciones (Imágenes de radar Meteorológico y Pluviómetros)	15
2.2. Métodos de Interpolación	20
2.2.1. Estudios relacionados sobre IDW (Inverso de la Distancia)	22
3. MATERIALES Y MÉTODOS	23
3.1. Descripción de la Zona de Estudio	23
3.2. Materiales	24
3.2.1. Información de Pluviómetros	24
3.2.2. Cálculo de precipitación a una escala temporal de 15 minutos para pluviómetros	27
3.2.3. Exploración de la relación entre estaciones pluviométricas y radar meteorológico con regresión	28
3.2.4. Identificación de eventos de precipitación de naturaleza fuerte durante los meses de Abril y Mayo del 2015	29
3.2.5. Información de Imágenes de Radar Meteorológico	34
3.3. Métodos	35
3.3.1. IDW (Peso del Inverso de la Distancia)	36
3.3.2. IDW más integración de imágenes de Radar	37
3.3.3. Validación Cruzada	39
3.3.4. Implementación en R	40
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	42
4.1. Exploración de la relación entre estaciones pluviométricas y radar meteorológico con regresión	42
4.2. Distribución de la precipitación de pluviómetros y radar meteorológico	46
4.3. Estimaciones Resultado de las Interpolaciones	49
4.4. Parámetros Resultados de la Validación Cruzada	55
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	66
5.1. Conclusiones	66



5.2. Recomendaciones	67
6. REFERENCIAS.....	68
7. ANEXOS	73
A. Script Implementado en R	73
B. Gráficos de distribución de precipitación en pluviómetros y radar CAXX en los diferentes alcances de reflectividad para los eventos 2 y 3.....	88
C. Imágenes de estimación de precipitación usando IDW e IDW más integración de imágenes de radar meteorológico para los eventos 1, 2,3 en los alcances de reflectividad de 20, 60 y 100km a tres resoluciones 100, 250 y 500 m	91
D. Gráficos de dispersión de los parámetros resultados de validación para los eventos 2 y 3	132

Lista de Tablas

Tabla 1. Estaciones Pluviométricas.	26
Tabla 2. Porcentaje de vacío de datos.	27
Tabla 3. Interpretación del coeficiente de correlación.	29
Tabla 4. Eventos de lluvia seleccionados.	31
Tabla 5. Eventos de lluvia en el período Abril - Mayo 2015 de las estaciones seleccionadas.	32
Tabla 6. Parámetros de Bondad de Ajuste en la regresión para el alcance del radar de 20 km.	43
Tabla 7. Parámetros de Bondad de Ajuste en la regresión para el alcance del radar de 60 km.	44
Tabla 8. Parámetros de Bondad de Ajuste en la regresión para el alcance del radar de 100 km.	45
Tabla 9. Resultados de los parámetros de validación para el Evento 1 en un alcance de reflectividad del radar de 20 km a una resolución de 100m.	57
Tabla 10. Resultados de los parámetros de validación para el Evento 1 en un alcance de reflectividad del radar de 60 km a una resolución de 250m.	57
Tabla 11. Resultados de los parámetros de validación para el Evento 1 en un alcance de reflectividad del radar de 100 km a una resolución de 500m.	57
Tabla 12. Resultados de los parámetros de validación para el Evento 2 en un alcance de reflectividad del radar de 20 km a una resolución de 100m.	64
Tabla 13. Resultados de los parámetros de validación para el Evento 2 en un alcance de reflectividad del radar de 60 km a una resolución de 250m.	64

Tabla 14. Resultados de los parámetros de validación para el Evento 2 en un alcance de reflectividad del radar de 100 km a una resolución de 500m.....64

Tabla 15. Resultados de los parámetros de validación para el Evento 3 en un alcance de reflectividad del radar de 20 km a una resolución de 100m.65

Tabla 16. Resultados de los parámetros de validación para el Evento 3 en un alcance de reflectividad del radar de 60 km a una resolución de 250m.65

Tabla 17. Resultados de los parámetros de validación para el Evento 3 en un alcance de reflectividad del radar de 100 km a una resolución de 500m.65

Tabla de Figuras

Figura 1. Ilustración de los errores ligados a la intercepción del haz con el terreno: ecos de suelo y zonas de subdetección.19

Figura 2. Área de estudio y distribución de estaciones pluviométricas por alcance de reflectividad de radar.25

Figura 3. Volumen acumulado de lluvia para el período Abril – Mayo de las 25 estaciones pluviométricas.28

Figura 4. Número total de eventos de las estaciones seleccionadas.....31

Figura 5. Comparación visual de Imagen de radar vs Imagen de interpolación de pluviómetros.35

Figura 6. Estructura de la Metodología del estudio.36

Figura. 7. Mapa de predicción de lluvia integrando IDW más imagen de radar meteorológico.38

Figura 8. Correlograma a escala temporal de 15 minutos de la estación OPNC del evento 1 en alcance de reflectividad de 20. 60 y 100 km43

Figura 9. Distribución del Evento 1 de precipitación a intervalos de 15 minutos usando información pluviométrica frente a distribución de precipitación usando imágenes de radar meteorológico en el alcance de reflectividad de radar meteorológico de 20 km.....47

Figura 10. Distribución del Evento 1 de precipitación a intervalos de 15 minutos usando información pluviométrica frente a distribución de precipitación usando imágenes de radar meteorológico en el alcance de reflectividad de radar meteorológico de 60 km.48

Figura 11. Distribución del Evento 1 de precipitación a intervalos de 15 minutos usando información pluviométrica frente a distribución de precipitación usando imágenes de radar meteorológico en el alcance de reflectividad de radar meteorológico de 100 km.48

Figura 12. Estimación de Precipitación para el Evento 1 a una resolución espacial de 100 m en un alcance de reflectividad de 20km correspondiente a la fecha 21/04/2015 15:50 mediante IDW e IDW más integración de imágenes de radar meteorológico	50
Figura 13. Estimación de Precipitación para el Evento 1 a una resolución espacial de 250 m en un alcance de reflectividad de 60km correspondiente a la fecha 21/04/2015 15:50 mediante IDW e IDW más integración de imágenes de radar meteorológico.	50
Figura 14. Estimación de Precipitación para el Evento 1 a una resolución espacial de 500 m en un alcance de reflectividad de 100km correspondiente a la fecha 21/04/2015 15:50 mediante IDW e IDW más integración de imágenes de radar meteorológico.	51
Figura 15. Estimación de Precipitación para el Evento 2 a una resolución espacial de 100 m en un alcance de reflectividad de 20km correspondiente a la fecha 26/04/2015 12:20 mediante IDW e IDW más integración de imágenes de radar meteorológico.	52
Figura 16. Estimación de Precipitación para el Evento 2 a una resolución espacial de 250 m en un alcance de reflectividad de 60km correspondiente a la fecha 26/04/2015 12:20 mediante IDW e IDW más integración de imágenes de radar meteorológico	52
Figura 17. Estimación de Precipitación para el Evento 2 a una resolución espacial de 500 m en un alcance de reflectividad de 100km correspondiente a la fecha 26/04/2015 12:20 mediante IDW e IDW más integración de imágenes radar meteorológico.	53
Figura 18. Estimación de Precipitación para el Evento 3 a una resolución espacial de 100 m en un alcance de reflectividad de 20km correspondiente a la fecha 03/05/2015 17:05 mediante IDW e IDW más integración de imágenes radar meteorológico.	54
Figura 19. Estimación de Precipitación para el Evento 3 a una resolución espacial de 250 m en un alcance de reflectividad de 60km correspondiente a la fecha 03/05/2015 17:05 mediante IDW e IDW más integración de imágenes de radar meteorológico.	54
Figura 20. Estimación de Precipitación para el Evento 3 a una resolución espacial de 500m en un alcance de reflectividad de 100km correspondiente a la fecha 03/05/2015 17:05 mediante IDW e IDW más integración de imágenes de radar meteorológico.	55
Figura 21. Medida del Error Medio para el Evento 1 en un alcance de reflectividad de 20 km mediante IDW vs IDW más integración de imágenes. .	58



Figura 22. Medida de la raíz del Error Cuadrático Medio para el Evento 1 en un alcance de reflectividad de 20 km mediante IDW vs IDW más integración de imágenes.	58
Figura 23. Medida de la Correlación entre Observaciones y las Predicciones para el Evento 1 en un alcance de reflectividad de 20 km mediante IDW vs IDW más integración de imágenes.	59
Figura 24. Medida del Error Medio para el Evento 1 en un alcance de reflectividad de 60 km mediante IDW vs IDW más integración de imágenes. .	60
Figura 25. Medida de la raíz del Error Cuadrático Medio para el Evento 1 en un alcance de reflectividad de 60 km mediante IDW vs IDW más integración de imágenes.	60
Figura 26. Medida de la Correlación entre Observaciones y las Predicciones para el Evento 1 en un alcance de reflectividad de 60 km mediante IDW vs IDW más integración de imágenes.	61
Figura 27. Medida del Error Medio para el Evento 1 en un alcance de reflectividad de 100 km mediante IDW vs IDW más integración de imágenes.	62
Figura 28. Medida de la raíz del Error Cuadrático Medio para el Evento 1 en un alcance de reflectividad de 100 km mediante IDW vs IDW más integración de imágenes.	62
Figura 29. Medida de la Correlación entre Observaciones y las Predicciones para el Evento 1 en un alcance de reflectividad de 100 km mediante IDW vs IDW más integración de imágenes.	63



CLÁUSULA DE DERECHO DE AUTOR

Yo, Luis Ángel Salinas Orrego autor de la tesis **"COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DE DATOS DE PRECIPITACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL PROVENIENTES DE PLUVIÓMETROS Y UN RADAR METEOROLÓGICO EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO PAUTE."** reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Ambiental. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 14 de Junio de 2017

Luis Ángel Salinas Orrego

C.I: 0106067218



CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Yo, Luis Ángel Salinas Orrego autor de la tesis
"COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN PARA
LA EVALUACIÓN DE DATOS DE PRECIPITACIÓN ESPACIAL Y
TEMPORAL PROVENIENTES DE PLUVIÓMETROS Y UN
RADAR METEOROLÓGICO EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO PAUTE".

Certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 14 de Junio de 2017

Luis Ángel Salinas Orrego

C.I: 0106067218



AGRADECIMIENTO

Quiero dejar constancia de mi profundo agradecimiento a todos quienes contribuyeron para el desarrollo del presente estudio. Mi reconocimiento especial a Daniela Ballari, por el valioso aporte de conocimiento e ideas fundamentales para el desarrollo del proyecto, al Ing. Alex Avilés, a la Ing. Johanna Orellana y al Ing Mario Gualpa por toda la colaboración y asesoría realizada para el emprendimiento del proyecto. Gracias al Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca, mi reconocimiento especial hacia ETAPA EP por concederme la oportunidad de participar en el proyecto "Identificación de los procesos hidrometeorológicos que desencadenan crecidas extremas en la ciudad de Cuenca a partir de la información suministrada por un radar de precipitación" , quiero agradecer a mis familiares, a mi madre Esperanza Orrego, mi padre Luis Salinas y mi hermana Chio quienes son los pilares de mi vida, a mis amigos Jesús, Damián, Santiago , Diego, Jorge, Pinos y Chino y amigas Alexandra, Lisbeth por el apoyo consejos y comentarios que me han brindado.

Luis Ángel Salinas Orrego

Cuenca, 20 de Marzo del 2017

1. INTRODUCCIÓN

La precipitación a nivel mundial usualmente es estudiada debido a que los seres vivos dependen de ella como fuente de agua dulce en los ecosistemas, y por ende es vital para la supervivencia de las especies que necesitan de este recurso (Hrachowitz & Weiler, 2010). Tomando en cuenta que la precipitación varía en el espacio y en el tiempo de acuerdo con el patrón general de circulación atmosférica y con factores locales (Chow et al., 1994) y es uno de los principales procesos del ciclo hidrológico, el conocimiento de su distribución espacial es fundamental para la predicción de otras variables ambientales íntimamente relacionadas como son: el escurrimiento total, las inundaciones y la recarga de los acuíferos (Mora & Willems, 2012; Tapiador et al., 2011; Serrano, et al., 2003).

En el Ecuador se han desarrollado esfuerzos para incrementar el conocimiento sobre eventos naturales siendo la precipitación uno de éstos; no obstante el estudio de la variabilidad de la lluvia aún es limitado (Abad, 2014; Buytaert, Céleri, Willems, Bièvre, & Wyseure, 2006; Céleri, Willems, Buytaert, & Feyen, 2007; Vallejo, 2014). Esta situación se agrava más cuando se trata de entender la dinámica de la precipitación en áreas pequeñas, como en las ciudades. Este es el caso de la ciudad de Cuenca donde la precipitación es producida por tormentas convectivas, caracterizadas por una alta variabilidad espacial, lo cual implica un alto grado de complejidad en la modelación de su comportamiento. El monitoreo de las variables meteorológicas todavía no es el indicado para responder a los efectos que producen las características geográficas y orográficas del país (Pourrut, Rovere, Romo, & Villacrés, 1995).

Los pluviómetros proveen mediciones puntuales precisas, pero para poder satisfacer las exigencias de precisión que permitan representar adecuadamente la distribución espacial de la lluvia, se tendría que recurrir a la implementación de una red meteorológica de monitoreo muy densa con un gran número de pluviómetros, sin embargo por el costo de los equipos, el mantenimiento y la recolección de datos de las redes de pluviómetros hacen que éstas sean prohibitivas para países o regiones subdesarrolladas. Por lo

tanto, cuando la red de pluviómetros es escasa las estimaciones de precipitación, obtenidas a través de interpolación muestran un alto grado de incertidumbre (Hrachowitz & Weiler, 2010). Esto es de especial importancia para el caso de la precipitación asociada con las tormentas convectivas, las cuales se caracterizan por una alta variabilidad espacial y temporal.

El radar meteorológico surge como un instrumento alternativo. El mismo se utiliza para estimar la precipitación espacial debido que posee la capacidad de registrar de manera continua grandes áreas alrededor del dispositivo. Sin embargo este instrumento también posee sus desventajas entre las cuales son bloqueos orográficos, ecos falsos, atenuación, evaporación de la lluvia antes de llegar al suelo, propagación anómala, funcionamiento del equipo de radar, efecto de advección, afectación por la altura sobre el terreno, afectación por los diferentes tipos de tormentas, calibración del radar (Calheiros & Zawadzki, 1987).

Por las razones anteriormente expuestas, resulta importante contar con metodologías que permitan modelar la variabilidad espacial de la precipitación combinando de una manera apropiada la información proveniente de los pluviómetros con las imágenes de radar. En la presente tesis se propone la aplicación de una de las técnicas de interpolación para modelar la distribución espacial de la precipitación en la cuenca alta del río Paute. Con este fin se aplica el procedimiento de estimación IDW (Inverse Distance Weighted, Peso del Inverso de la Distancia) e IDW más la integración de imágenes de radar meteorológico con datos de pluviómetros. Este método se eligió sobre otros de tipo geoestadístico (Kriging) ya que la región cuenta con un número escaso de pluviómetros, no siendo adecuada su aplicación. Para llevar a cabo la realización del método de interpolación se requirió seleccionar 3 eventos fuertes de lluvia a una escala temporal de 15 minutos registrados en el período Abril – Mayo del 2015, además se necesitó del uso de la programación en el software R 3.3.2 (<http://www.R-project.org>).



1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Comparar dos métodos de interpolación: IDW y IDW más la integración de imágenes de radar meteorológico para estimar la precipitación espacial a una escala temporal de 15 minutos en 3 eventos fuertes de lluvia en la cuenca alta del río Paute y a tres resoluciones espaciales de 100, 250 y 500 m en los alcances de reflectividad del radar meteorológico de 20 km, 60 km y 100 km

1.1.2. Objetivos Específicos

- Obtener las imágenes de radar meteorológico CAXX a una escala temporal de 15 min en las distintas resoluciones espaciales.
- Realizar el control de calidad de los datos obtenidos por los pluviómetros en la zona de estudio en los meses de Abril y Mayo del 2015.
- Aplicar el método de interpolación IDW a tres resoluciones espaciales (100, 250 y 500 m).
- Aplicar el método de interpolación IDW más integración de imágenes de radar CAXX a tres resoluciones espaciales (100, 250 y 500 m).
- Aplicar validación cruzada y medidas de errores estadísticos para comparar ambos métodos de interpolación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Observación de Datos de Precipitaciones (Imágenes de radar Meteorológico y Pluviómetros)

La precipitación es la variable más importante del ciclo hidrológico del agua y puede definirse como el ingreso de agua que se encuentra en la atmósfera a la superficie terrestre. La precipitación puede presentarse de diferentes maneras, ya sea en estado líquido como lluvia o estado sólido como granizo o nieve, lo cual dependerá de la temperatura a la que se encuentre la masa de aire. Este proceso inicia cuando el vapor de agua en el aire alcanza el punto de saturación mediante el aumento de humedad o disminución de temperatura, lo cual da paso a la condensación o sublimación inversa del vapor de agua, o también la congelación del agua. Las gotitas de agua o cristallitos de hielo formados por los procesos descritos se van uniendo y van adquiriendo el peso suficiente para vencer la fuerza ascendente que los mantiene en suspensión en la atmósfera para posteriormente precipitar (Casas & Alarcón, 1999).

Existen varios factores como: latitud, altitud, relieve, continentalidad, exposición a circulaciones regionales entre otros, que influyen en la ocurrencia del proceso de precipitación. La compleja dinámica de éstos factores produce diferentes mecanismos de generación de lluvia (Casas & Alarcón, 1999; R. Rodríguez, Capa, & Lozano, 2004), entre los cuales se destacan los siguientes:

- Masas de aire frontales.- Este mecanismo se produce por la convergencia de dos masas de aire que se encuentran a diferentes temperaturas llamadas frente cálido y frente frío. La convergencia de éstos dos frentes produce que el aire frío se mueva por debajo del aire caliente haciendo que este ascienda en la atmósfera hasta encontrar temperaturas más bajas que permitan que ocurra la precipitación.
- Convección.- Este mecanismo sucede cuando existen temperaturas altas en la superficie produciendo que el aire ascienda rápidamente, se generen nubes del tipo cumulus y alcancen alturas elevadas. Las nubes convectivas por lo general son las precursoras de lluvias muy fuertes y de corta duración.

- Advección.- Es el proceso de transporte de una propiedad atmosférica por el campo de masa con un movimiento horizontal, lo cual en meteorología, típicamente se evalúa utilizando el viento total. En este proceso el aire húmedo se desplaza y llega a una superficie fría.
- Efectos orográficos.- Este mecanismo se produce cuando las elevaciones de la superficie terrestre se interponen en el movimiento de las masas de aire, lo cual genera que el aire ascienda, reduciendo sus temperaturas y produciendo precipitación. La precipitación generada por este efecto se desarrolla comúnmente en el barlovento de las montañas; sin embargo, es necesario mencionar que de acuerdo a las condiciones de las masas de aire, estas pueden generar precipitaciones en el sotavento.

Según Krajewski & Ciach, (2003), la precipitación está relacionada directamente a diferentes factores orografía, altitud, latitud, temperatura, efectos de advección, convección, masas de aires frontales lo cual produce características únicas en diversas partes geográficas del mundo. Además, se vuelve indispensable la medición y estudio de esta variable meteorológica debido a la gran incidencia que la precipitación tiene en distintas aplicaciones (Berndtsson & Niemczynowicz, 1988).

En la actualidad existen una gran cantidad de técnicas para monitorear la precipitación. Una de las formas más práctica y sencilla es el uso del pluviómetro. El pluviómetro de balancín es un equipo diseñado para la medición de la precipitación, el cual registra la cantidad de lluvia en un determinado momento de tiempo. Este dispositivo consiste en un cilindro cuyo extremo superior posee un embudo que desemboca en un balancín ubicado en el interior del cilindro. Este a, su vez está conectado a una microcomputadora llamada data logger el mismo que se encarga de almacenar la hora en la que se produce el contacto por el vaivén del balancín. El volumen que el reservorio del balancín puede soportar dependerá de las características del equipo y es llamado resolución del equipo, cuya medida es expresada en milímetros de lluvia (mm) (Goudenhoofdt & Delobbe, 2009). A pesar de la veracidad de la

información brindada por dicho instrumento, no está exento a errores y, en la mayoría de casos, no hace posible la representación de la precipitación. Es así que para obtener una óptima (precisa y en tiempo real) estimación del fenómeno, es necesario contar con una o varias redes de pluviómetros (Hill, et al., 2010).

La escasa densidad de estaciones pluviométricas en gran parte de nuestra región, dificulta el desarrollo de aplicaciones, la verificación de los pronósticos numéricos y la calibración de pronósticos probabilísticos que tienen la potencialidad de mejorar la calidad de la información (Ruiz, 2009). Debido a esta condición, a la estimación de precipitación se le puede agregar información complementaria para una estimación más real de la precipitación en una determinada región. Con los avances tecnológicos en la actualidad se han creado nuevas metodologías y equipos de monitoreo, así encontramos el radar meteorológico que poseen un funcionamiento similar a un faro. La antena de un radar gira continuamente para iluminar o barrer los objetivos que se desean observar en un cierto volumen de la atmósfera, el radar envía pulsos electromagnéticos de una gran potencia 250 kW y de muy corta duración en dirección radial hacia el infinito. Cualquier objeto que se encuentra al paso reflejará parte de la energía recibida, una pequeña porción de esta energía regresa al radar que al detectarla permitirá ubicar la posición del objeto así como su opacidad, esta magnitud es conocida como reflectividad (Z) que es en realidad lo que mide el radar. (Moshinsky & M, 1995).

Un sistema de radar meteorológico es diseñado para la detección y estimación de la intensidad de la lluvia a distancias cortas. Su combinación de alta resolución espacial y temporal es excelente para proveer información detallada a los meteorólogos sobre precipitaciones locales. La resolución espacial se refiere a la nitidez y calidad de detalles visibles dentro de una imagen, cuanto menor es la superficie terrestre que es representada en cada píxel de una imagen digital mayores son los detalles que pueden ser captados y por consiguiente la resolución espacial es mayor. Por otro lado la resolución temporal mide la frecuencia con la que un sensor remoto puede obtener imágenes de un área delimitada (Moshinsky & M, 1995).

Según Sánchez Rafael, (2014), un sistema de radar meteorológico a pesar de poseer la capacidad de registrar de manera continua grandes áreas alrededor del mismo presenta errores en sus medidas tales como:

- **Errores en calibración electrónica:** La calibración electrónica del radar se refiere a la medida de los parámetros agrupados bajo la constante C de la ecuación del radar. Para ello se utiliza un generador de señal de potencia conocida, amplitud estable y onda continua y se determina su pérdida al pasar a través del receptor. En general, tras dicha calibración todavía pueden existir errores residuales o variaciones temporales que sea necesario corregir.
- **Errores debidos a la interceptación del haz con el terreno:** La intersección del haz por parte del lóbulo principal como de los lóbulos secundarios con el relieve (relieves del suelo, edificios, etc.) produce medidas de reflectividad que no están relacionadas con la lluvia y que se denominan ecos de suelo.

Existen dos problemas que habitualmente se producen:

- a) En aquellas zonas donde el haz intercepte un obstáculo se registrará una reflectividad no relacionada con la lluvia, usualmente llamada eco de suelo. En caso de precipitación, obstáculo y lluvia interaccionarán de forma que la medida final de reflectividad estará contaminada (no representara únicamente la lluvia).
- b) En las zonas situadas más allá de la intersección aparecerán zonas de subdetección de la lluvia debido a que en dichas zonas la reflectividad se calcula suponiendo que éstas reciben la totalidad de la energía del haz, cuando en realidad sólo llega una parte debido al bloqueo orográfico del haz. En caso de que el haz quede totalmente bloqueado aparecerán zonas ciegas en las que no será posible registrar la reflectividad.

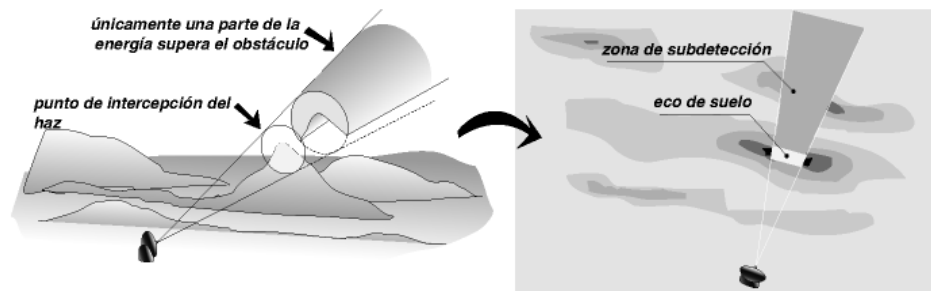


Figura 1 Ilustración de los errores ligados a la intercepción del haz con el terreno: ecos de suelo y zonas de subdetección. **Fuente:** GRAHI UPC (2014).

Atenuación: La atenuación es la pérdida de energía que sufre el haz de radar debido a la absorción y dispersión de ésta por parte de las gotas y los gases de la atmósfera. Los radares afectados por la atenuación son principalmente los de banda C y los de X (de forma muy severa).

Errores con la distancia al radar: Uno de los problemas principales que afectan a la estimación de lluvia por radar es que, a medida que aumenta la distancia a éste el haz aumenta de tamaño y se sitúa a mayor altura. Como resultado, la resolución de la medida se degrada con la distancia (ya que aumenta el ancho del volumen de resolución), y además se aleja de la lluvia junto al suelo (lo deseable desde el punto de vista hidrológico).

Errores relacionados con la variación de la relación Z-R: La relación entre la intensidad de lluvia (R) y la reflectividad (Z) se establece a partir de la distribución de los diámetros de las gotas (precipitación convectiva y estratiforme). Las disparidad entre diversas medidas de en generación de precipitaciones convectivas pueden ser importante y fundamentalmente se deben a las diferencias físicas en procesos tales como la ordenación de gotas, la agregación, coalescencia y colapso de éstas durante su desarrollo. El predominio de uno u otro proceso, está en muchos casos ligado al tipo de lluvia. Todo ello se traduce en un considerable número de relaciones Z-R catalogadas en función del tipo de precipitación o la localización geográfica del experimento. La utilización de una Z-R errónea para transformar las medidas de reflectividad a lluvia produce una infravaloración (o sobrevaloración) de la lluvia.

2.2. Métodos de Interpolación

La interpolación espacial es “un procedimiento que permite calcular el valor de una variable en una posición del espacio, conociendo los valores de esa variable en otras posiciones del espacio” (Bosque, 2000). Los diferentes métodos de interpolación espacial se clasifican en dos grandes categorías: determinísticos y probabilísticos (Maune et al., 2001). Los métodos de interpolación determinísticos calculan un valor para celda de la cuadrícula usando únicamente las propiedades físicas de las muestras de precipitación (Goovaerts, 1997). El método de interpolación determinístico más comúnmente empleado es la ponderación en función inversa de la distancia o IDW (Inverse Distance Weighting; Wise, 2000). IDW se encuentra disponible en la mayoría de los programas de sistemas de información geográfica SIG (Pérez et al, 2009). Otro método de interpolación determinístico ampliamente utilizado es el método ANUDEM, desarrollado por Hutchinson (1988). Al igual se presenta otro método determinístico de isoyetas en el que se utiliza la ubicación y captura para cada estación de datos, así como el conocimiento de los factores que afectan a estas capturas para trazar las isoyetas. La cantidad de lluvia en el lugar no muestreado se calcula por interpolación dentro de las isoyetas. Una limitación de esta técnica es que se necesita una densa red de monitoreo para establecer con precisión las isoyetas (Goovaerts, 2000). Otro método determinístico es el de Polígonos de Thiessen es equivalente al método del vecino más próximo; todos los puntos dentro del polígono tienen el mismo valor que es igual al valor del punto con datos desde el cual se genera el polígono; en la práctica, esto se resuelve por el método muy conocido de dibujar los polígonos de Voronoi alrededor de cada uno de los puntos con datos (Pardo, 1998).

Los métodos de interpolación probabilísticos, en contraste con los métodos determinísticos, infieren una gran cantidad de información utilizando las muestras disponibles (Maune et al., 2001). Los métodos de interpolación probabilísticos más comunes son los métodos geoestadísticos derivados de la forma genérica de Kriging (Goovaerts, 1997). La geoestadística es la rama de la estadística aplicada que se especializa en el análisis y la modelación de la variabilidad espacial en ciencias de la tierra. Su objeto de estudio es el análisis

y la predicción de fenómenos en espacio y/o tiempo tomando en cuenta la autocorrelación espacial y direccional de los datos (Webster & Oliver, 2007). A diferencia de los métodos de interpolación determinísticos que se basan en funciones matemáticas, los métodos geoestadísticos se basan en métodos estadísticos y matemáticos que permiten crear superficies y evaluar la incertidumbre de las predicciones que se realicen. (Johnston et al., 2003).

Dentro de los métodos geoestadísticos se tiene dos clasificaciones Kriging y Cokriging. Kriging proporciona una solución para el problema de la estimación basada en un modelo continuo de variación espacial estocástica, tomando en cuenta la forma en que una propiedad varía en el espacio mediante el modelo de variograma (Webster & Oliver, 2007), abarca una serie de métodos basados en mínimos cuadrados, éstos son: Kriging ordinario, universal, simple, indicador y disyuntivo. A diferencia de otros estimadores lineales ponderados Kriging incorpora los criterios de continuidad espacial, redundancia de datos y anisotropía mediante el uso de variogramas (Díaz Viera, 2002).

Se presenta una serie de dificultades al momento de escoger el método de interpolación adecuado, existen varias técnicas disponibles, tal como el clásico de polígonos de Thiessen, IDW (Inverse Distance Weight o Peso del Inverso de la Distancia), splines, Kriging, co-Kriging, entre otros. Siendo los métodos multivariantes los que presentan resultados más reales, según la experiencia previa (Abad Encalada 2014).

Los principales, y más utilizados, métodos de integración de información pluviométrica con datos de sensores remotos corresponden a la corrección de sesgo medio (Mean field bias correction, MFB), el ajuste rango dependiente (Range – Dependent Adjustment, RDA), corrección de sesgo estático local (Static Local Bias Correction, SLB) (Goudenhoofdt and Delobbe 2009), polígonos de Thiessen, vecino más cercano, el inverso de la distancia al cuadrado (Haberlandt 2007), Kriging ordinario, Kriging con deriva externa, Kriging universal, co-Kriging y Kriging residual (Chappell et al. 2013; Goudenhoofdt and Delobbe 2009; Haberlandt 2007; Manz et al. 2016; Mounier et al. 2012).

2.2.1. Estudios Relacionados sobre IDW (Inverso de la Distancia)

En el ámbito internacional encontramos al Servicio Nacional de Meteorología de los EEUU desarrolló el método por el cual se calcula la profundidad de la precipitación desconocida como un promedio ponderado de los valores que rodean el punto, los pesos son recíprocos a los cuadrados de las distancias del lugar sin muestrear; éste método es conocido como el cuadrado inverso de la distancia o IDW por sus siglas en inglés (Guevara & J, 1987). La literatura existente sobre métodos y técnicas utilizadas en el análisis de datos climáticos, en forma general, es amplia y detallada en cuanto a las múltiples aplicaciones que tiene esta rama de las matemáticas en los campos meteorológicos, climáticos e hidrológicos, igualmente ocurre con el tratamiento estadístico particular de la información pluviométrica.

En el Sur-Este de Alemania, Haberlandt (2007) publicó los resultados de la caracterización de precipitación horaria para las cuencas de los ríos Obere Elbe, Mulde y Weibe Elster, donde compara diferentes métodos de interpolación usando información adicional proveniente de un radar, una red de pluviómetros y la topografía de dicha zona de estudio. Principalmente, el objetivo del autor, es analizar los resultados de utilizar Kriging con deriva externa. Como referencia usó los métodos univariados de Kriging ordinario, indicador Kriging, polígonos de Thiessen, vecino más cercano y el inverso de la distancia (IDW), y de ésta manera realizar comparaciones entre las diversas técnicas empleadas.

De acuerdo a FAO (2001), la aplicación del método IDW para el caso de las variables temperatura y precipitación, se sustenta en el concepto de zonalidad climática, es decir en la similitud de las condiciones climáticas del punto para el cual se requiere la determinación de las variables del clima, en relación con los puestos de observación o estaciones más cercanas de registro. Rodríguez (2004), muestra como el método de interpolación Inversa de la Distancia Ponderada, se usa normalmente para el análisis de precipitación, proporcionando información de precisión. Kravchenko y Bullock (1999), mencionan que a pesar de que el uso correcto del número de valores vecinos más cercanos puede mejorar la interpolación, éstos valores no pueden ser

obtenidos con base en las propiedades estadísticas de los datos. Kravchenko (2003), recomienda el IDW para bases de datos pequeñas, también cuando la distancia de muestreo es muy grande e incluso para cuando la distancia de muestreo es mayor al rango de la correlación espacial. Con relación a esto es importante mencionar que la precisión de las estimaciones es influenciada por la varianza aleatoria, la estructura de variación, y por la intensidad de muestreo (Lozano et al. 2004). Además, en el caso particular analizado en este trabajo no fue posible utilizar métodos geoestadísticos dado que el escaso número de pluviómetros impedía una adecuada estimación del variograma, por lo que se empleó el uso de método de interpolación Inverso de la Distancia (IDW).

3. MATERIALES Y METODOS

3.1. Descripción de la Zona de Estudio

El área de estudio que corresponde parte de la cuenca alta del río Paute, una zona localizada al Sur de los Andes Ecuatorianos, en una región de depresión interandina, entre los 713544 E y 9659449 N (Figura 2). Su altitud varía desde 440 m.s.n.m. hasta 4680 m.s.n.m. A pesar de sus altitudes no presenta nevados o glaciares, esto debido a su proximidad al eje ecuatorial (Celleri et al., 2007). Además, en esta zona se encuentra el Observatorio Ecohidrológico Quinuas, ubicado en la cabecera del río Tomebamba que desemboca en el río Amazonas y éste en el Océano Atlántico, con un rango de elevación entre 2600 a 4000 m s. n. m. De acuerdo al mapa Geológico de la República del Ecuador (1982), la cuenca está comprendida por las formaciones Túri y Macuchi. Parte de la cuenca alta, comprende al Parque Nacional Cajas (3160 a 4445 m. s. n. m.) que son áreas protegidas contiguas (Delgado et al., 2006). El parque consiste en un 90% de pastizales de páramo llamados pajonales (Minga & Verdugo, 2007). La región presenta evidencia de glaciación del Pleistoceno con fuertes pendientes, pequeños valles en forma de U y lagos (Astudillo et al., 2015). Otra zona que se encuentra en el área de estudio es la ciudad de Cuenca perteneciente al cantón Cuenca de la provincia del Azuay. Es una de las ciudades más importantes del país debido a su desarrollo poblacional y económico. Su población es de 500000 habitantes y su superficie alcanza los 70 km². Además, fue declarada en 1999 Patrimonio Cultural de la UNESCO

debido a su riqueza arquitectónica y su diversidad cultural. La ciudad se localiza en la parte centro sur del país, en un valle del callejón interandino de la cordillera de los Andes, a 2550 m s.n.m. Debido a su característica de valle, se encuentra cerca de varias formaciones rocosas entre la que destaca el macizo del Cajas. El clima en la zona de estudio está influenciada por el régimen de la costa del Pacífico por el oeste y mayormente por masas de aire continentales y tropicales del Atlántico por el este (Buytaert et al., 2006).

Según el estudio realizado por Célleri et al. (2007), la ciudad de Cuenca se encuentra localizada en una zona donde la distribución de la precipitación presenta una estructura bimodal, en la cual su estación seca ocurre entre los meses de Junio a Agosto; con una media anual de 660 mm a 1100 mm. Este comportamiento complejo de la precipitación puede ser atribuido al hecho que la cordillera andina presenta una estrecha sección transversal en su paso a lo largo del Ecuador (Célleri et al. 2007).

3.2. Materiales

3.2.1. Información de Pluviómetros

El área de estudio consiste de 13 estaciones pluviométricas proporcionadas por el Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales (IDRHICA) y 12 estaciones pluviométricas de la empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca (ETAPA EP). Como se puede observar en la Figura 2 existen 11 pluviómetros que se encuentran en el alcance de reflectividad del radar de 20 km, se podría decir que el número total de 25 pluviómetros se encuentran en el alcance de reflectividad del radar de 60 y 100 km. En la Tabla 1 se presenta las coordenadas geográficas de las estaciones pluviométricas, su nombre así como su codificación. Las coordenadas geográficas fueron levantadas con datum WGS84 (coordenadas planas x, y). Existe una variación de la altitud de los pluviómetros entre 1896 m.s.n.m hasta 3955 m.s.n.m., es decir, hay un desnivel máximo de hasta 2059 m.

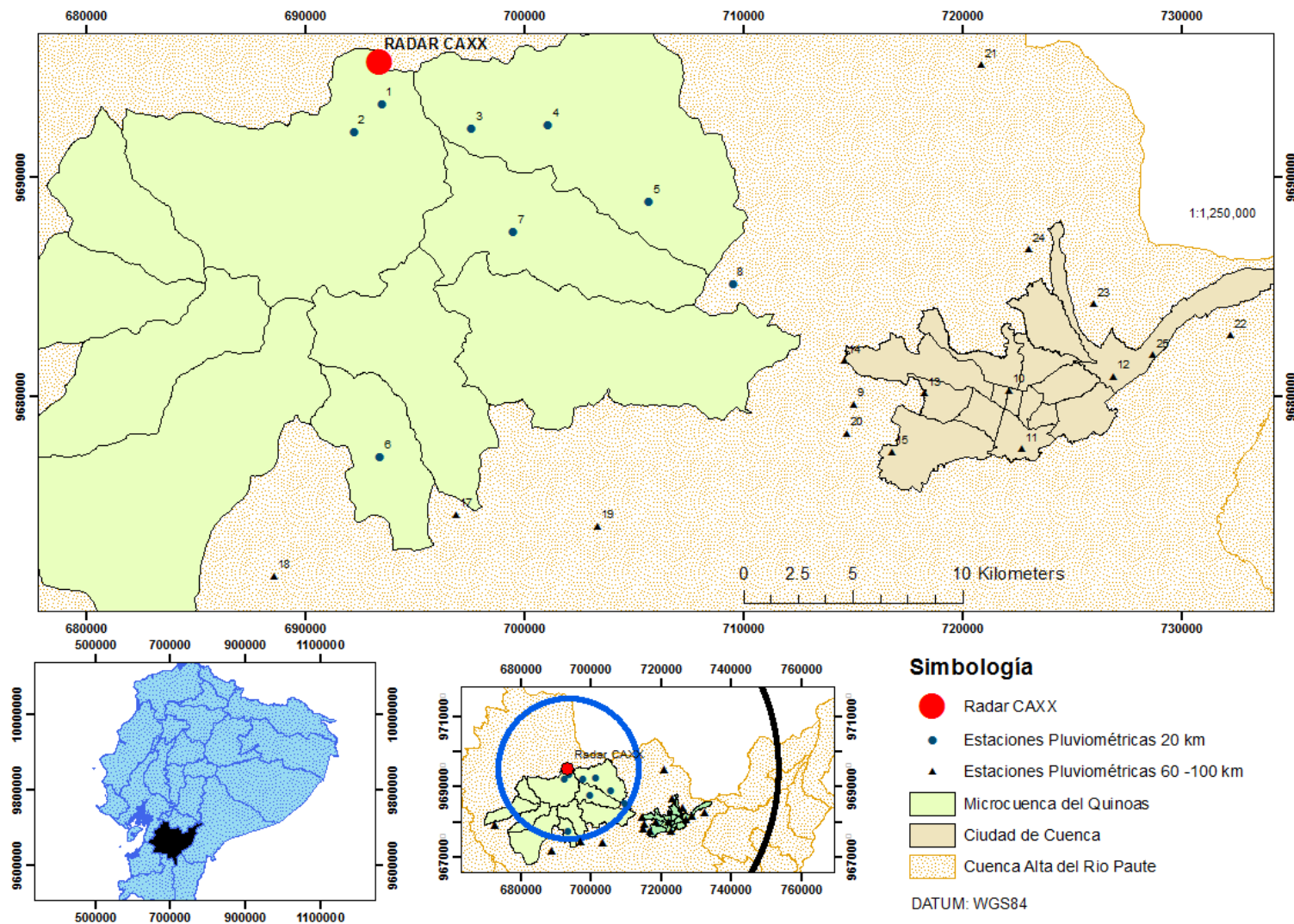


Figura 2. Área de estudio y distribución de estaciones pluviométricas por alcance de reflectividad de radar.

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA (2015) Realizado por: Autor

En la tabla que se presenta a continuación, se puede observar los datos correspondientes a las estaciones pluviométricas mostradas en la Figura 2.

Tabla 1 Estaciones Pluviométricas.

Estaciones	Código	Nombre	X	Y	Altura (msnm)	20 km	60 km	100 km
1	RP	ROQUE PRADO	693494	9693335	3935	X	X	X
2	HM	HUAGRAHUMA	692246	9692069	3770	X	X	X
3	TD	TOREADORA	697618	9692227	3955	X	X	X
4	VC	VIRGEN DEL CAJAS	701110	9692382	3626	X	X	X
5	CY	CHIRIMACHAY	705703	9688895	3298	X	X	X
6	IC	IZHCAYRRUMI C.	693422	9677234	3748	X	X	X
7	MC	MAMAMAG CAMPING	699520	9687482	3592	X	X	X
8	OPNC	OFI. PARQUE NACIONAL CAJAS	709548	9685135	3060	X	X	X
9	HZ	HUIZIL	714747	9678318	2773	X	X	X
10	SY	SAYAUSI	714620	9681624	2712	X	X	X
11	CA	CASA ANA	715049	9679628	2655	X	X	X
12	YP	YANUNCAY EN PUCÁN	703349	9674079	3000		X	X
13	SP	SOLDADOS EN PATAR	696891	9674608	3269		X	X
14	SU	SAUCAY	720890	9695100	2979		X	X
15	CH	CHAULLABAMBA	732240	9682775	2521		X	X
17	TX	TIXAN	723026	9686691	2708		X	X
18	UC	UCUBAMBA	728722	9681876	2425		X	X
19	CCS	CANCAN S.	688622	9671795	3700		X	X
20	ZM	ZONA MILITAR	722146	9680256	2568		X	X
21	BY	BALZAY	718285	9680121	2603		X	X
22	CM	CASA MARIO	726933	9680898	2476		X	X
23	CE	CASA ESTEBAN	716820	9677467	2557		X	X
24	BE	BODEGAS ETAPA	722149	9677604	2518		X	X
25	CC	CHAUCHA C. DE CEDRO	672548	9679160	1896		X	X

DATUM WGS84

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA

Realizado por: Autor

El procesamiento de datos comenzó con el Análisis Exploratorio de Datos (AED), que corresponde comúnmente a un “primer vistazo” a los datos crudos, y que presenta una idea clara de las características de la información. El primer control realizado fue la observación del porcentaje de vacíos presentes en el registro de precipitaciones en las estaciones pluviométricas, lo que permitió remover información de ciertas estaciones con series incompletas, por lo tanto solo se seleccionaron las estaciones con series de información completas para los 3 eventos de precipitación el alcance de 20 km, 60 km y 100 km. A continuación se presenta la Tabla 2 con el porcentaje de vacíos para las estaciones de RP, IC, CH, el resto de estaciones no presento ningún vacío en su información.

Tabla 2. Porcentaje de vacío de datos.

Código	Porcentaje de vacío de datos (%)
RP	4.21
IC	13.62
CH	12.17

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA Realizado por: Autor

En esta etapa del Análisis Exploratorio no se removió ninguna estación del estudio debido a que las estaciones que presentan vacíos no coincidieron con las fechas de los 3 eventos seleccionados para los métodos de interpolación.

3.2.2. Cálculo de precipitación a una escala temporal de 15 minutos para pluviómetros

La información obtenida de precipitación de las estaciones de ETAPA–iDRHICA son registradas cada cinco minutos únicamente cuando los dispositivos registran valores de precipitación a partir de esta base de datos se realizó la agregación de la precipitación cada 15 minutos mediante el software Microsoft Excel ®. Se obtuvo los valores acumulados para los 25 pluviómetros de los que se tiene información de precipitación para los meses de Abril – Mayo 2015 (Figura 3). Estos meses fueron seleccionados debido a que la región Sierra presenta un período lluvioso de Octubre a Mayo, con valores de altas precipitaciones en Abril, Mayo y después en octubre o

noviembre. El período seco se manifiesta entre Junio y Septiembre. Este régimen de precipitación se caracteriza como bimodal por sus dos picos de precipitación en el año. La precipitación anual varía entre 660 y 1100 mm (INAMHI, 2013). De acuerdo al comportamiento de la curva del volumen acumulado de lluvia de las estaciones HM, ZM, CM, CE, TD, VC, OPNC, SY, MC, SU, BE, YP, CY se aprecia que estas se comportan de manera similar, su volumen fluctúa entre 0 a 280 mm. Es importante observar que la mayor diferencia se da entre las estaciones RT, IC, VC, BY, UC, CH, SP, HZ, CA, TX, RP, CCS presentan un valor menor de lluvia que va de 0 a 160 mm y un comportamiento diferente de la curva de volumen acumulado.

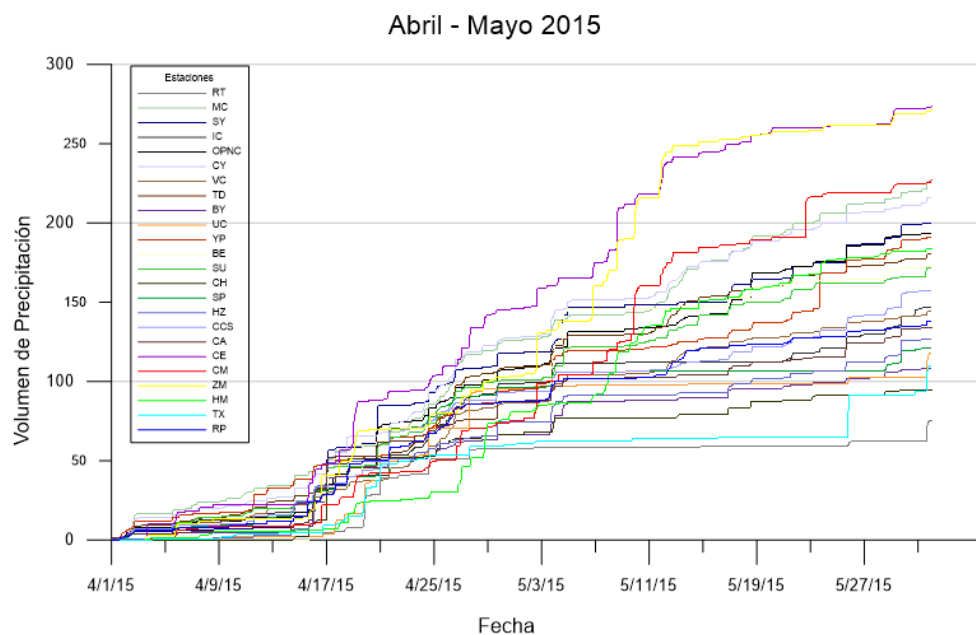


Figura 3. Volumen acumulado de lluvia para el período Abril - Mayo de las 25 estaciones pluviométricas.

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA (2015) **Realizado por:** Autor

3.2.3. Exploración de la relación entre estaciones pluviométricas y radar meteorológico con regresión

Una de las maneras de saber la existencia de correlación entre variables es aplicar el coeficiente de correlación de Pearson (r). Resulta difícil precisar a partir de qué valor del coeficiente de correlación se puede considerar que existe una correlación lineal entre dos variables, sin embargo, para tener un

referente, se utilizó lo anotado por (Bisquerra, 1989) para la interpretación de los valores de los coeficientes de correlación entre series de datos.

Tabla 3. Interpretación del coeficiente de correlación

$r = 1$	Correlación perfecta
$0.8 < r < 1$	Correlación muy alta
$0.6 < r < 0.8$	Correlación alta
$0.4 < r < 0.6$	Correlación moderada
$0.2 < r < 0.4$	Correlación baja
$0 < r < 0.2$	Correlación muy baja
$r = 0$	Correlación nula

Fuente: Bisquerra, (1989)

Para determinar la relación que existe entre las imágenes de radar meteorológico y los pluviómetros, se aplicó correlación y regresión lineal entre los datos de los 25 pluviómetros y las imágenes de radar meteorológico, debido a que estas proporcionan una manera de medir la fuerza de asociación entre las dos fuentes de información. Los resultados obtenidos a partir de esta exploración mostraron que de los 25 pluviómetros que se tienen, 11 de éstos poseen una alta correlación con las imágenes del radar, los pluviómetros restantes no poseen una buena correlación y coeficiente de determinación R^2 por lo que han sido excluidos del análisis, es decir, el proceso de interpolación se realizó con 11 estaciones pluviométricas en el alcance de reflectividad del radar de 60 y 100 km y con 8 estaciones pluviométricas en el alcance de reflectividad de 20 km, De los pluviómetros seleccionados los siguientes se encuentran en la región del cajas al noreste de la ciudad de Cuenca OPNC, CY, IC, YP, TD, VC, MC y las estaciones pluviométricas de BE, BY, SY, UC se encuentran en la Ciudad de Cuenca los valores obtenidos se muestran en la sección de resultados.

3.2.4. Identificación de eventos de precipitación de naturaleza fuerte durante los meses de Abril y Mayo del 2015

Según Padrón (2013) en su estudio “Análisis de la estructura de la lluvia de páramo” un evento se declara finalizado cuando haya transcurrido un lapso de

30 minutos en el que no exista un registro de lluvia. Tomando esto en consideración se procedió a determinar todos los eventos registrados para las estaciones pluviométricas (BE, OPNC, CY, IC, YP, TD, BY, VC, SY, MC, UC) seleccionadas para el análisis. Debido a que nuestro análisis será tanto espacial como temporal, se consideró como la duración del evento desde el primer al último dato de lluvia registrado por cualquier estación. Es decir, si el primer valor de un evento en el área de estudio se registra en la estación OPNC y el último valor en la estación BE, la duración del evento será el tiempo que transcurrió desde el primer valor en OPNC hasta el último valor en BE. Una vez identificados y delimitados los eventos del período Mayo – Abril 2015 con los valores totales de lluvia (mm), se observó que la zona de estudio presentan eventos con volúmenes elevados (desde 54.92 mm hasta 117.19 mm). Se observa en la Tabla 4 que durante los dos meses de análisis se produjeron 76 eventos de precipitación de los cuales se presentan eventos de lluvia con valores inferiores a los 15 mm en 15 minutos aproximadamente el 35% de los casos, lo que indica que éstos eventos se encuentran en el rango de lluvia moderado. Sin embargo existen valores muy altos aproximadamente el 65% lo que se puede sugerir la presencia de celdas de lluvia altamente convectivas. Al contar con una gran cantidad de eventos, fueron seleccionados tres de ellos, los cuales presentaban mayor volumen registrados con el fin de usar dichos eventos para el proceso posterior de interpolación usando IDW y IDW más la integración de imágenes de radar meteorológico.

Como se observa en la Tabla 3 y en la Figura 4 los eventos seleccionados ocurren en fechas diferentes con una duración máxima que va desde las 6 horas a 20 horas y el volumen máximo que va desde los 54.92 mm hasta los 117.19 mm.

EVENTOS DE PRECIPITACIÓN ABRIL - MAYO 2015

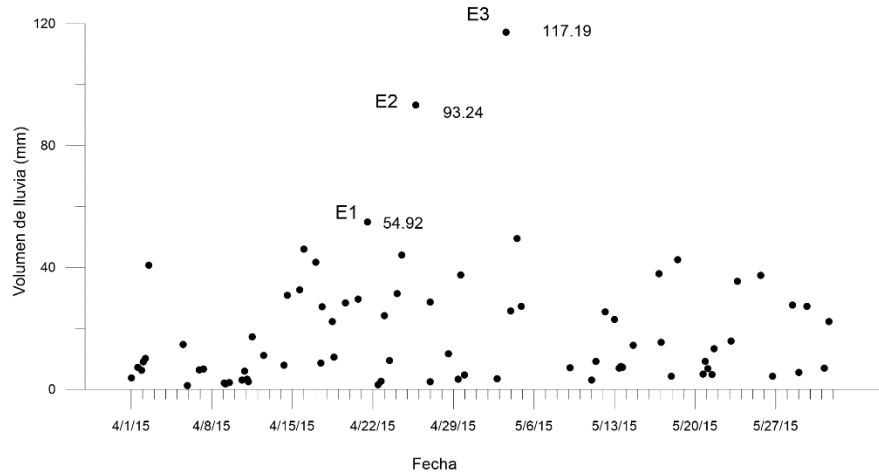


Figura 4. Número total de eventos de las estaciones seleccionadas.

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA (2015) Realizado por: Autor

Tabla 4. Eventos de lluvia seleccionados

Eventos	Duración (Horas)	Fecha Inicio	Fecha Fin	Vol. Max. (mm)	# Imágenes Generadas (Anexos C)
E1 (E31)	6	21/04/2015 12:50	21/04/2015 18:50	54.92	63
E2 (E38)	20	25/04/2015 17:50	26/04/2015 13:50	93.24	450
E3 (E46)	6	03/05/2015 13:50	03/05/2015 19:50	117.19	72

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA

Realizado por: Autor

Tabla 5. Eventos de lluvia en el período Abril – Mayo 2015 de las estaciones seleccionadas.

Evento	Inicio de Evento	Fin de Evento	mm total	Evento	Inicio de Evento	Fin de Evento	mm total
E1	01/04/2015 00:20	01/04/2015 01:50	3.8	E39	26/04/2015 23:50	27/04/2015 10:05	28.5
E2	01/04/2015 14:20	01/04/2015 15:35	7.3	E40	26/04/2015 23:50	28/04/2015 12:50	2.5
E3	01/04/2015 21:50	02/04/2015 00:20	6.3	E41	28/04/2015 13:50	28/04/2015 15:05	11.6
E4	02/04/2015 01:05	02/04/2015 05:20	9	E42	29/04/2015 09:35	29/04/2015 12:20	3.3
E5	02/04/2015 06:05	02/04/2015 09:05	10.2	E43	29/04/2015 15:35	29/04/2015 20:20	37.5
E6	02/04/2015 12:35	02/04/2015 21:05	40.8	E44	29/04/2015 23:05	30/04/2015 03:20	4.8
E7	05/04/2015 12:05	05/04/2015 14:05	14.7	E45	02/05/2015 19:20	02/05/2015 21:20	3.5
E8	05/04/2015 21:20	05/04/2015 22:50	1.3	E46	03/05/2015 13:50	03/05/2015 19:50	117.1
E9	06/04/2015 21:50	06/04/2015 23:50	6.4	E47	03/05/2015 23:20	04/05/2015 01:50	25.7
E10	07/04/2015 07:20	07/04/2015 10:35	6.7	E48	04/05/2015 12:50	04/05/2015 16:05	49.5
E11	09/04/2015 02:20	09/04/2015 03:35	2.1	E49	04/05/2015 21:50	05/05/2015 00:20	27.2
E12	09/04/2015 05:05	09/04/2015 06:35	1.8	E50	09/05/2015 03:05	09/05/2015 05:35	7.1
E13	09/04/2015 12:20	09/04/2015 13:05	2.2	E51	11/05/2015 00:20	11/05/2015 01:20	3.1
E14	10/04/2015 15:05	10/04/2015 16:35	3	E52	11/05/2015 09:20	11/05/2015 13:20	9.2
E15	10/04/2015 20:20	10/04/2015 23:20	6	E53	12/05/2015 04:50	12/05/2015 12:50	25.4
E16	11/04/2015 01:50	11/04/2015 03:35	3.4	E54	13/05/2015 00:20	13/05/2015 07:35	23
E17	11/04/2015 04:05	11/04/2015 06:50	2.5	E55	13/05/2015 09:35	13/05/2015 11:35	6.9
E18	11/04/2015 12:50	11/04/2015 16:20	17.2	E56	13/05/2015 13:20	13/05/2015 16:35	7.5
E19	12/04/2015 12:35	12/04/2015 14:50	11.2	E57	13/05/2015 17:05	13/05/2015 20:35	7.2
E20	14/04/2015 07:05	14/04/2015 09:05	7.9	E58	14/05/2015 14:35	14/05/2015 19:05	14.5
E21	14/04/2015 13:20	14/04/2015 17:50	30.9	E59	16/05/2015 20:20	16/05/2015 23:50	37.9
E22	15/04/2015 15:20	15/04/2015 17:35	32.7	E60	17/05/2015 00:50	17/05/2015 05:50	15.4
E23	16/04/2015 00:35	16/04/2015 06:35	46	E61	17/05/2015 22:05	18/05/2015 02:35	4.3
E24	17/04/2015 01:20	17/04/2015 04:05	41.6	E62	18/05/2015 11:35	18/05/2015 16:35	42.4
E25	17/04/2015 11:20	17/04/2015 13:20	8.7	E63	20/05/2015 16:35	20/05/2015 18:20	5
E26	17/04/2015 14:35	17/04/2015 17:05	27	E64	20/05/2015 20:50	21/05/2015 00:05	9.2
E27	18/04/2015 11:35	18/04/2015 14:05	22.3	E65	21/05/2015 02:35	21/05/2015 05:50	6.8



E28	18/04/2015 15:20	18/04/2015 17:35	10.6	E66	21/05/2015 10:50	21/05/2015 12:05	4.8
E29	19/04/2015 15:05	19/04/2015 16:35	28.3	E67	21/05/2015 15:50	21/05/2015 17:05	13.3
E30	20/04/2015 17:20	20/04/2015 20:05	29.6	E68	23/05/2015 02:50	23/05/2015 10:05	15.9
E31	21/04/2015 12:50	21/04/2015 18:50	54.9	E69	23/05/2015 16:05	23/05/2015 19:20	35.5
E32	22/04/2015 10:50	22/04/2015 12:05	1.5	E70	25/05/2015 16:20	25/05/2015 18:20	37.4
E33	22/04/2015 17:20	22/04/2015 19:05	2.6	E71	26/05/2015 17:20	26/05/2015 18:50	4.3
E34	23/04/2015 00:20	23/04/2015 09:20	24.2	E72	28/05/2015 11:05	28/05/2015 14:20	27.6
E35	23/04/2015 10:35	23/04/2015 14:50	9.4	E73	29/05/2015 00:05	29/05/2015 02:20	5.5
E36	24/04/2015 02:35	24/04/2015 10:05	31.3	E74	29/05/2015 16:50	29/05/2015 19:35	27.2
E37	24/04/2015 12:50	24/04/2015 15:05	44.1	E75	31/05/2015 05:35	31/05/2015 07:35	7
E38	25/04/2015 17:50	26/04/2015 13:50	93.2	E76	31/05/2015 14:50	31/05/2015 16:35	22.2

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA

Realizado por: Autor

3.2.5. Información de Imágenes de Radar Meteorológico

Se utilizaron imágenes del radar CAXX ubicado en el cerro Paraguillas, las cuales presentan las siguientes características: tamaño de 8 bits de 100 x 100 km, con una resolución de 100, 250 y 500 m; se obtienen cada 5 minutos. La estimación de la tasa de lluvia (R) [mm/h] se efectúa indirectamente a partir de la variable de reflectividad (Z). Ambas variables están relacionadas ya que son dependientes de la distribución de tamaño de gotas, la cual está sujeta a constantes variaciones de un evento de lluvia a otro, incluso dentro de un mismo evento esta distribución de gotas presenta variabilidad espacio-temporal (Zawadzki, 1984; Joss y Zawadzki, 1997). Según Marshall y Palmer (1948), a partir de datos experimentales de Z y R se ha evidenciado la existencia de una relación empírica entre ambas variables denominada relación Z-R se expresa en base a la ley de potencia:

$$Z = a R^b \quad (1)$$

Los coeficientes a y b de la función son constantes empíricas. La intensidad de la precipitación (R) es un producto del contenido másico y de la velocidad de caída en un volumen de medición de radar. No existe una relación única entre la reflectividad del radar y la intensidad de las precipitaciones, debido a que los coeficientes a y b varían con el origen y tipo de lluvia, la distribución del tamaño de las gotas, localización geográfica, condiciones meteorológicas, entre otros (Marshall y Palmer, 1948).

Para el cálculo de transformación a escala de 15 minutos se requirió el procesamiento de conversión a tasa de lluvia en [mm] a partir de la variable reflectividad (Z) a través de una ley de potencia, también conocida como relación Z-R. A partir de esta transformación la unidad de medición de ambos sensores: pluviómetros y radar meteorológico se homologan usando los datos de precipitación registrados por los pluviómetros en las diferentes estaciones y se comparan con las estimaciones del radar en las grillas correspondientes a las estaciones. La relación Z-R utilizada para la transformación a tasa de lluvia es la siguiente $Z = 235 R^{1.2}$ (Joss y Zawadzki, 1997), la cual pertenece a un comportamiento de lluvia fuerte (convectiva). En la Figura 5 se presenta un ejemplo comparativo visual entre las dos agregaciones. La imagen de la

izquierda es obtenida del radar y la de la derecha a partir de interpolación IDW de pluviómetros (será detallado en secciones subsiguientes). La imagen generada corresponde a un evento de precipitación en la fecha 21/04/2015 a las 15:05.

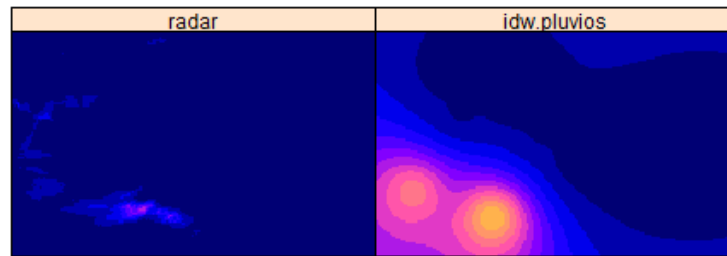


Figura 5. Comparación visual de Imagen de radar vs Imagen de interpolación de pluviómetros.

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA (2015) **Realizado por:** Autor

3.3. Métodos

Los métodos a implementar en el presente trabajo, corresponden a las técnicas de interpolación IDW e IDW más integración de imágenes de radar. El método de IDW fue seleccionado debido a que el kriging presentaba limitaciones por el escaso número de pluviómetros y debido a la cantidad elevada de observaciones de valor 0 de lluvia. Por ello el variograma no se puede estimar de manera adecuada y las estimaciones de kriging resultaban erróneas. De manera que se planteó como alternativa utilizar el método IDW como método determinístico al contrario de kriging que es un método probabilístico o geoestadístico. Para contemplar su porcentaje de efectividad también se desarrolló el proceso de validación cruzada. En la Figura 6 se observa el flujograma correspondiente a la metodología utilizada para el proceso de interpolación.

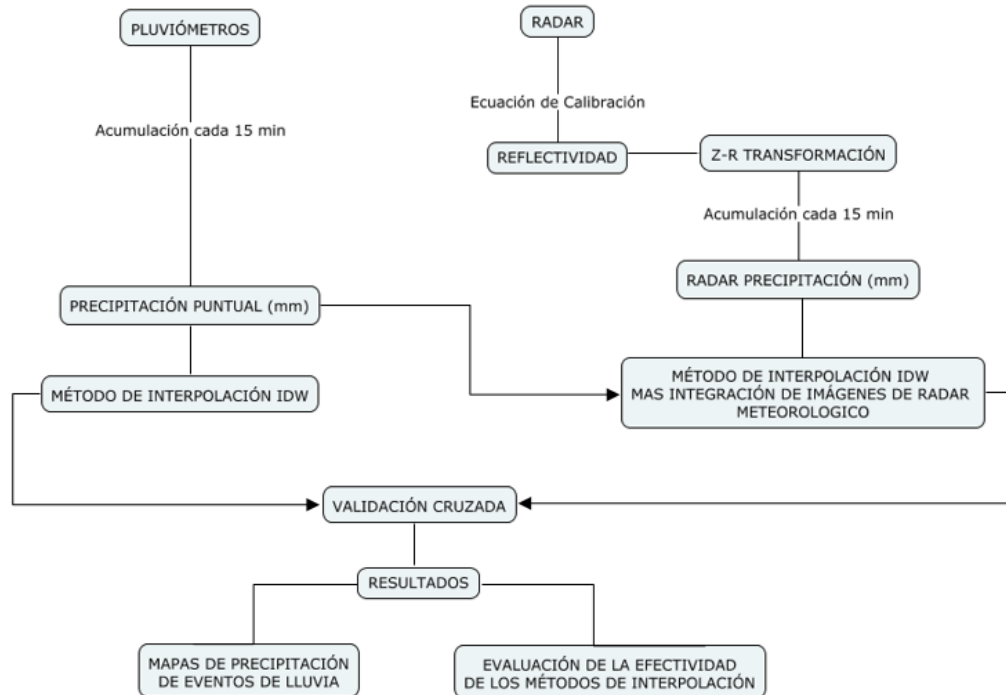


Figura 6. Estructura de la Metodología del estudio.

Realizado por: Autor

3.3.1. IDW (Peso del Inverso de la Distancia)

IDW este método asume que cada punto posee una influencia local que disminuye con la distancia; de esta manera, el método pondera con mayor fuerza a los puntos con datos cercanos al punto de valor desconocido y con menor peso sobre aquellos ubicados a mayor distancia (Tveito & Schöner, 2002).

La función matemática de IDW es la siguiente:

$$\hat{z}(x_j) = \frac{\sum_{i=1}^n z(x_i) \cdot d_{ij}^{-\alpha}}{\sum_{i=1}^n d_{ij}^{-\alpha}} \quad (2)$$

Donde:

\hat{z} = es el valor estimado en el punto x_j .

x_j = Punto en los que se estima el valor de la variable.

x_i = Puntos muestrales vecinos

z = valor observado de la variable en el punto muestral dentro de la región de vecindad.

n = Número de puntos muestrales utilizados en la estimación

d_{ij} = Distancia euclidiana entre x_j y x_i .

α = Exponente de potencia.

Mediante IDW es posible controlar la importancia de los puntos conocidos sobre los valores interpolados en base a la distancia y la potencia del peso. Al definir una potencia alta, mayor será el énfasis sobre los puntos más cercanos en tanto que al definir una potencia menor, se le dará un menor énfasis a los puntos más cercanos.

3.3.2. IDW más integración de imágenes de Radar

La aplicación del IDW más la integración de imágenes de radar meteorológico consiste en desarrollar en primer lugar la superficie de corrección de imágenes. Al medir el radar meteorológico y los pluviómetros la misma variable y presentar la mismas unidades no se necesita plantear una regresión, por ello la superficie de corrección se efectuó directamente sobre las imágenes de radar. La superficie de corrección se obtiene de la diferencia entre los pluviómetros (puntuales, previo a la interpolación) y los pixeles del radar sobre los que se localizan los pluviómetros. Luego estas diferencias (residuos o correcciones) se interpolan con IDW. Después de esto se procede a la suma de imagen de radar meteorológico y mapa interpolado de residuos (Radar + IDW residuos) para generar la imagen integrada de las dos fuentes de información. Este método se aplicó para el conjunto de imágenes en los alcances de reflectividad de 20, 60 y 100 km (resoluciones de 100, 250 y 500 metros respectivamente). La Figura 7 muestra gráficamente el procedimiento realizado.

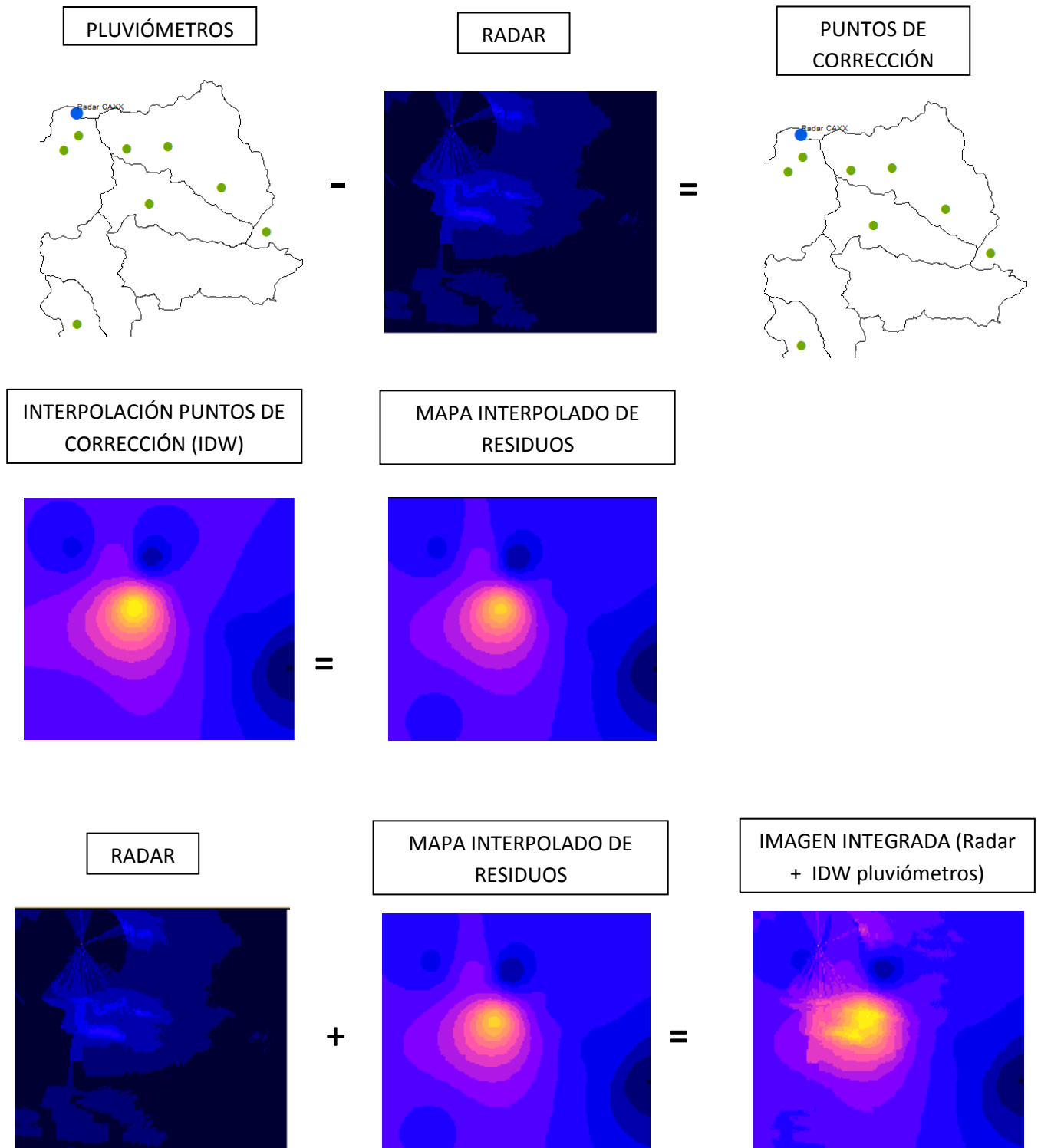


Figura. 7. Mapa de predicción de lluvia integrando IDW más imagen de radar meteorológico.

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA (2015) Realizado por: Autor

3.3.3. Validación Cruzada

La validación cruzada se utiliza para evaluar la predicción realizada con los métodos de IDW e IDW más integración de imágenes de radar meteorológico. Consiste en excluir de la interpolación la observación de uno de los n puntos de muestreo y con las $n - 1$ observaciones restantes, predecir el valor de la variable en el lugar del punto excluido (Giraldo, 2002). Este procedimiento se repite n veces con la intención de disponer de valores observados y de valores interpolados. A partir de los residuos se calculan medidas de desempeño, como es el caso de la raíz del error medio cuadrático, media del error y correlación entre observación y predicción.

- Raíz del Error Cuadrático Medio (RSME): Evalúa el error de las estimaciones del radar meteorológico en comparación con las de los pluviómetros con un énfasis en valores extremos, siendo perfecto cuando lo estimado por el radar es igual a la medición de los pluviómetros, que en este caso sería cuando el RMSE es igual a cero.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Pm_{xi} - Pp_{xi})^2} \quad (3)$$

- Dónde:

Pm_{xi} = Valor predicho en el punto xi .

Pp_{xi} = Valor medido en punto xi .

n = Número de puntos.

- Media del Error (ME): corresponde al promedio de los valores de los residuales, obtenidos mediante la validación cruzada, presentando valores bajos, idealmente cero.

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_{x1}^* - Z_{x1}) \quad (4)$$

- Dónde:

Z_{x1}^* = Valor predicho en el punto xi .

Z_{x1} = Valor medido en el punto xi .

n = Número de puntos

- Correlación entre los Valores Observados y los valores de Predicción (Cor.), el valor de la correlación será cercano a uno mientras mejor sea el método de estimación.

$$\text{Cor} = \frac{\sigma_{Z_x^* Z_x}}{\sigma_{Z_x^*} \sigma_{Z_x}} \quad (5)$$

- Dónde:
 $\sigma_{Z_x^* Z_x}$ = Covarianza entre datos observados y predichos.
 $\sigma_{Z_x^*}$ = Desviación típica de los datos predichos.
 σ_{Z_x} = Desviación típica de los datos observados

3.3.4. Implementación en R

La implementación se realizó en el software R. A continuación se describe brevemente el procedimiento realizado. (Anexo A)

Transformación de reflectividad a taza de lluvia (mm).

- Las librerías utilizadas para la transformación de reflectividad a lluvia (mm) son raster, sp, dplyr, rtiff, pixmap, rgdal, string, foreach, doParallel, gdata.
- Acumular las imágenes correspondientes a los eventos de lluvia determinados
- Corregir las imágenes para transformar de reflectividad a taza de lluvia (mm)
- Agregar imágenes de radar cada 15 minutos
- Conseguir tiff multilayer por cada 15 minutos de imágenes (conjunto de imágenes)
- Conseguir tiff con precipitación en escala temporal de 15 minutos.
- Generar un archivo de texto con fechas y horas contenidas en tiff multilayer.
- Realizar las agregaciones utilizando la relación Z-R con los parámetros correspondientes a lluvia fuerte $a = 235$ y $b = 1.2$
- Resultado: conjunto de imágenes generadas de radar clasificadas por alcance de reflectividad 20, 60 y 100 km.

Generar Merged con información de pluviómetros e imágenes de radar meteorológico.

- Las librerías utilizadas son dirShp, maptools, raster, string, gdata .
- Leer coordenadas de las estaciones pluviométricas.
- Agregar datos de precipitación de pluviómetros cada 15 minutos.
- Generar data frame con los valores de lluvia, fechas y coordenadas de pluviómetros.
- Generar data frame con los valores de las imágenes de radar en puntos georeferenciados.
- Realizar la unión de datos de los puntos de la imagen de radar con los datos de los pluviómetros.
- Resultado: Archivo de texto del merge de información de pluvios y radar meteorológico para los eventos de precipitación.

IDW

- Las librerías utilizadas son rgdal, sp, gstat, raster, string, rgeos, rastervis
- Leer archivo de texto merge de información de pluvios y radar meteorológico de los eventos de precipitación.
- Determinar la zona de estudio de la interpolación.
- Desarrollar la interpolación IDW de pluviómetros a partir de la función krige (valor ~ 1,df, grid)
- Resultado: Mapas de estimación de precipitación de los eventos a partir del IDW de pluviómetros en los diferentes alcances de reflectividad del radar CAXX (20, 60 Y 100 km).
-

IDW más integración de imágenes

- Las librerías utilizadas son rgdal, sp, gstat, raster, string, rgeos, rastervis
- Leer imágenes de radar en los diferentes alcances 20, 60 y 100 km
- Realizar la diferencia de pluvios y radar para generar la superficie de corrección a partir de $df\$res <- df\$valor - df\$cov$
- Corrección con IDW con la función $idwres <- krige(res \sim 1, df, grid)$
- Resultado: Mapas de estimación de precipitación de los eventos a partir del IDW más integración de imágenes de radar meteorológico en los diferentes alcances de reflectividad del radar CAXX (20, 60 Y 100 km).

Validación Cruzada

- Realizar Validación cruzada de IDW de los pluviómetros utilizando los parámetros de ME, RSME, Cor.
- Realizar Validación cruzada de la superficie de corrección por residuos a partir de `idwvc <- krige(res ~ 1, df2, est)` utilizando los parámetros de ME, RSME, Cor.
- Resultados: Tres interpolaciones en los tres alcances de reflectividad del radar 20, 60 y 100 km aplicando IDW y tres interpolaciones aplicando IDW más integración de imágenes en los alcances de 20, 60 y 100 km. De cada interpolación usando el comando “mean ()” se han obtenido los errores de interpolación.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Exploración de la relación entre estaciones pluviométricas y radar meteorológico con regresión

Para determinar la relación que existe entre las imágenes de radar meteorológico y los pluviómetros, se aplicó correlación y regresión lineal entre los datos de pluviómetros y las imágenes. La relación R^2 es la medida que proporciona el grado de homogeneidad de la información entre los datos de éstos dos sensores. En la Figura 8 se observa el correlograma correspondientes a la estación OPNC donde podemos observar la relación R^2 entre las dos fuentes de información medidas en el alcance de reflectividad de radar de 20 km, 60 km y 100 km en el evento 1 como primera muestra de la relación entre los dos sensores analizados.

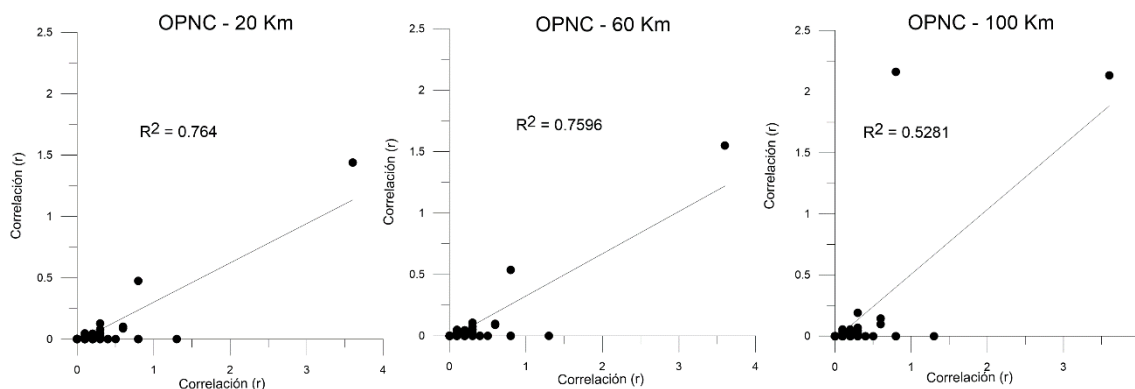


Figura 7. Correlograma a escala temporal de 15 minutos de la estación OPNC del evento 1 en alcance de reflectividad de 20, 60 y 100 km.

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA (2015)

Realizado por: Autor

En la Tabla 6, se observa para los 3 eventos determinados durante el mes de Abril y Mayo del 2015 la bondad de ajuste, conocido como el coeficiente de determinación (R^2), que fué empleado para evaluar la regresión lineal. Conjuntamente, se presenta el valor de coeficiente de correlación de Pearson (r) a la resolución espacial de 20 km.

Tabla 6. Parámetros de Bondad de Ajuste en la regresión para el alcance del radar de 20 km en los tres eventos seleccionados.

Estación	R	R^2
OPNC	0.873994496	0.764
CY	0.868391329	0.754
VC	0.565686166	0.32
TD	0.786611838	0.619
RP	0.393678821	0.155
SY	0.405936418	0.165
IC	0.780096892	0.609
MC	0.536188792	0.287
CA	0.081273742	0.007
HM	0.04545678	0.002
HZ	0.04982982	0.003

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA

Realizado por: Autor

Los valores más elevados para los coeficientes de correlación y de determinación, corresponden a las estaciones OPNC, CY, TD, IC, con un valor mayor a 0.6 en los dos parámetros de bondad de ajuste. Lo contrario ocurre en las estaciones VC, RP, SY, MC que presentan valores inferiores a 0.3 en el coeficiente de determinación. Por otro lado las estaciones de CA, HM, HZ presentan una correlación menor a 0.08, estas estaciones se han excluido del análisis al no presentar correlación alguna con la información de las imágenes de radar.

En la Tabla 7, se encuentran las medidas de los parámetros considerados anteriormente (r y R^2) para los tres eventos en las estaciones que se encuentran en el alcance de reflectividad del radar CAXX de 60 km. Los valores más elevados para los coeficientes de correlación y determinación

corresponden a los pluviómetros BE, OPNC, CY, IC, YP, TD con un valor mayor a los 0.6, mientras que para las estaciones de BY, VC, SY, MC, UC, presentan valores inferiores a 0.4 en el coeficiente de determinación. Lo contrario ocurre con los pluviómetros CA, ZM CM, HM, CE, CC, SP, CCS, HZ, SU, CH, RT, TX. RP que presentan una correlación y un coeficiente de determinación o bien valores menores a 0.12 en r y valores menores de 0.08 en R^2 , estas estaciones se han excluido del análisis al no presentar correlación alguna con la información de las imágenes de radar.

Tabla 7. Parámetros de Bondad de Ajuste en la regresión para el alcance del radar de 60 km en los tres eventos seleccionados.

Estación	R	R^2	Estación	R	R^2
BE	0.880848272	0.776	ZM	0.07564786	0.008
BY	0.641241353	0.411	CM	- 0.02392831	0.001
OPNC	0.871553148	0.76	HM	0.04545678	0.002
CY	0.863348875	0.745	CE	0.05839282	0.003
VC	0.577711505	0.334	CC	0.00489239	0.002
TD	0.792449129	0.628	SP	0.09838329	0.009
SY	0.414163029	0.172	CCS	0.12389349	0.029
IC	0.775702824	0.602	HZ	0.04982982	0.002
YP	0.741512775	0.55	SU	0.17626298	0.029
MC	0.528174246	0.279	CH	-0.00403213	0.002
UC	0.483617571	0.234	RT	0.07829102	0.006
CA	0.081273742	0.007	TX	0.06545768	0.007
RP	0.045676893	0.002			

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA

Realizado por: Autor

En la Tabla 8 se encuentran las medidas de los parámetros considerados anteriormente (r y R^2) para los tres eventos en las estaciones que se encuentran en el alcance de reflectividad del radar CAXX de 100 km. Los valores más elevados para los coeficientes de correlación y de determinación corresponden a los pluviómetros BE, OPNC, CY, IC, YP, con un valor mayor a los 0.5, por otro lado las estaciones de BY, VC, SY, MC, UC, TD presentan valores inferiores a 0.47 en el coeficiente de determinación. Lo contrario ocurre con los pluviómetros CA, ZM CM, HM, CE, CC, SP, CCS, HZ, SU, CH, RT, TX. RP que presentan una correlación y un coeficiente de determinación o bien valores menores a 0.13 en r y valores menores de 0.08 en R^2 , al igual que en el anterior caso se decidió descartar éstos pluviómetros que no presentan correlación alguna con la información de las imágenes de radar.

Tabla 8. Parámetros de Bondad de Ajuste en la regresión para el alcance del radar de 100 km en los tres eventos seleccionados.

Estación	R	R ²	Estación	R	R ²
BE	0.92679892	0.859	ZM	0.08765446	0.009
BY	0.68951347	0.475	CM	-0.0249876	0.001
OPNC	0.72667402	0.528	HM	0.04758493	0.002
CY	0.86681611	0.751	CE	0.05975437	0.001
VC	0.63267543	0.4	CC	0.00528765	0.002
TD	0.61281395	0.376	SP	0.09866439	0.013
SY	0.40697343	0.166	CCS	0.13679865	0.027
IC	0.75272078	0.567	HZ	0.04985643	0.001
YP	0.73756772	0.544	SU	0.17567868	0.029
MC	0.54178305	0.294	CH	-0.004765434	0.002
UC	0.48104911	0.231	RT	0.078563453	0.006
CA	0.08680870	0.01	TX	0.045545811	0.001
RP	0.04557673	0.002			

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA

Realizado por: Autor

Algunos trabajos referentes a buscar una relación entre precipitación y otras variables y la significancia de su correlación utilizando el coeficiente de Pearson han sido desarrollados, así por como ejemplo Konrad, (1996) asume como correlaciones fuertes cuando el coeficiente de Pearson es mayor que 0.60; Parrilla Alcalá & Ojeda Zújar, (2005) establece que para que realmente sea aplicable una correlación, el Coeficiente de Pearson (r) es necesario que tenga un valor superior a 0.70 y, de esa forma, su coeficiente de determinación (r^2) explique al menos un 50% de la variable dependiente. Guan, Wilson, & Makhnin, (2005) en su trabajo adoptan un coeficiente de correlación de 0.70 como el umbral para el uso de las variables secundarias como auxiliar de interpolación de precipitación en el método de cokriging.

Considerando que las variables derivadas de las imágenes se utilizarán como auxiliares de interpolación en el método IDW más integración de imágenes, éstas deben presentar buenas correlaciones con las series de datos de la precipitación. Se asume para este estudio que un coeficiente de correlación de Pearson $r \geq 0.60$ proporcionaría un grado alto de correlación (Bisquerra, 1989). Además este valor indica que la precipitación es explicada en al menos el 50% por la variable de las imágenes de radar meteorológico (Parrilla Alcalá & Ojeda Zújar, 2005). Se evidencia que en el área de estudio existe una débil o

inexistente correlación entre la precipitación y las imágenes de radar meteorológico como se observa en las Tablas 5, 6 ,7.

4.2. Distribución de la precipitación de Pluviómetros y radar meteorológico

Evento 1

Las Figuras 9, 10 y 11 presentan las series de tiempo para el evento 1 en los alcances de reflectividad del radar meteorológico de 20, 60 y 100 km. En la distribución de la precipitación en este alcance utilizando los pluviómetros se puede identificar diferentes patrones extremos como es el caso de los pluviómetros IC, VC, TD, CY que presentan una precipitación, entre 1.3 y 4.5 mm en el intervalo de 15 minutos. Por otro lado encontramos el gráfico de distribución de la precipitación a partir de la transformación a tasa de lluvia en (mm) de las imágenes de radar usando la relación Z-R. Se observa que la información proporcionada por las imágenes de radar en el pixel de las coordenadas de los pluviómetros presenta valores subestimados de precipitación, es decir que los valores encontrados son bajos en comparación a los valores de distribución de lluvia de los pluviómetros.

En el gráfico de precipitación por medio de las imágenes de radar, las estaciones de VC, TD, CY, IC, TD presentan una precipitación entre 0,21 y 0,49 mm en el intervalo de 15 minutos, además la estación SY no presenta valor de precipitación, es decir el radar CAXX no detecta precipitación en esa coordenada que al momento de compararlo con la distribución de precipitación en dicho pluviómetro, este si presenta valor de precipitación (0.5 mm).

En el alcance de 60km de reflectividad del radar al utilizar un número mayor de pluviómetros se cuenta con mayor información de la distribución de la precipitación para las 11 estaciones analizadas en este alcance. Se observó que los pluviómetros IC, VC, TD, YP, BE presentan valores altos (2.1 y 4.5 mm en el intervalo de 15 minutos). Por otro lado la distribución de la precipitación usando la relación Z-R muestran que para las estaciones de IC, MC, CY, VC, TD presentan una precipitación entre los 0.4 y 1.1 mm en el intervalo de 15 minutos, las estaciones SY, BY, UC, BE no presentan valor de precipitación

comparado con la distribución de los pluviómetros que presentan los siguientes valores SY (0.5 mm), BY(0.4 mm), UC (0.1 mm), BE(0.22 mm).

Para el alcance de 100 km de reflectividad del radar de igual manera observamos que en la distribución de la precipitación de los pluviómetros se presentan los mismos valores de lluvia de las estaciones presentes en los 60 km de reflectividad, por otro lado la distribución de la precipitación utilizando la información de las imágenes del radar CAXX si presenta variaciones siendo las estaciones IC, MC, CY, VC, TD con los valores más altos de lluvia entre 0.4 y 1.1 mm en el intervalo de 15 minutos, de igual manera que en la distribución de la precipitación en los 60 km de reflectividad del radar las estaciones SY, BY, UC, BE no presentan valor de precipitación.

En el apartado de Anexos B se presentan la distribución de la precipitación en pluviómetros y radar meteorológico de los eventos 2 y 3 en los diferentes alcances de reflectividad analizados.

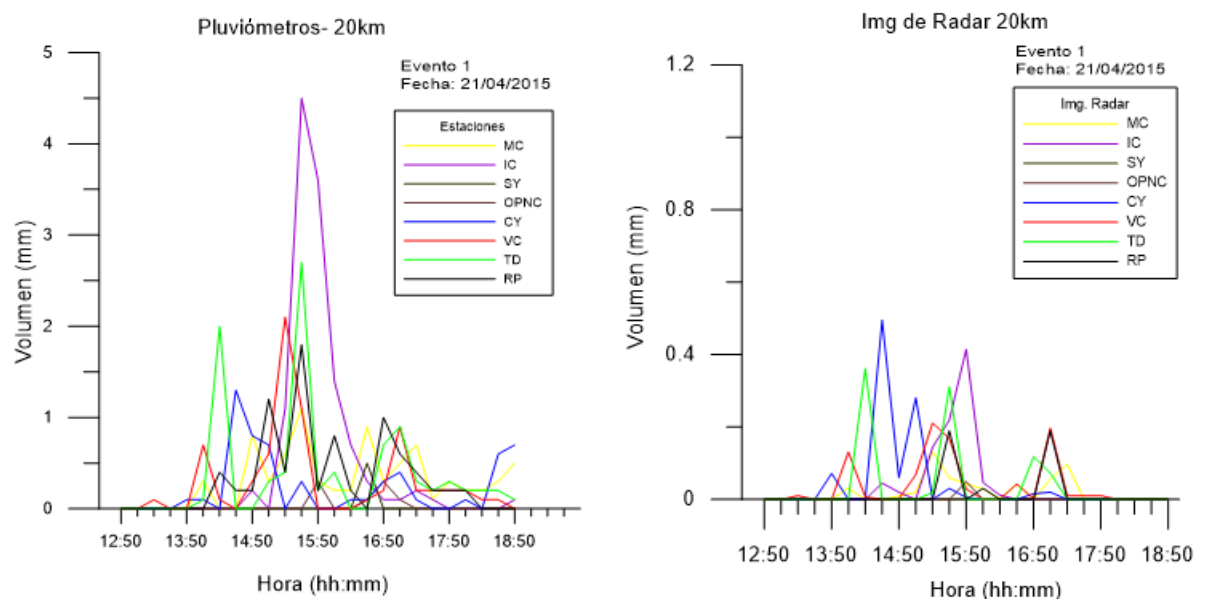


Figura 9. Distribución del Evento 1 de precipitación a intervalos de 15 minutos usando información pluviométrica frente a distribución de precipitación usando imágenes de radar meteorológico en el alcance de reflectividad de radar meteorológico de 20 km.

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA (2015) **Realizado por:** Autor

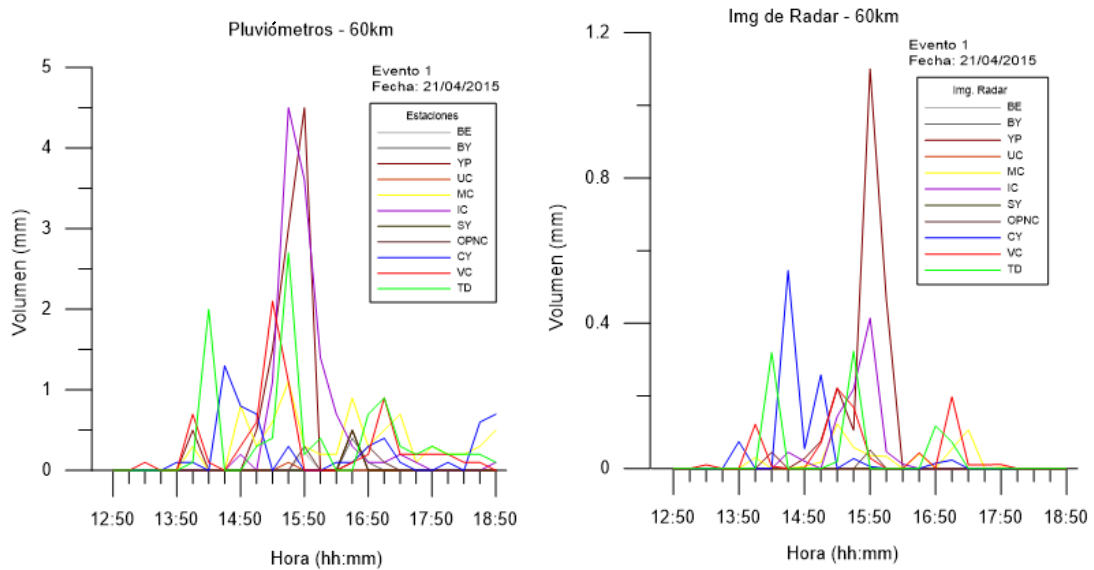


Figura 10. Distribución del Evento 1 de precipitación a intervalos de 15 minutos usando información pluviométrica frente a distribución de precipitación usando imágenes de radar meteorológico en el alcance de reflectividad de radar meteorológico de 60 km.

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA (2015) Realizado por: Autor

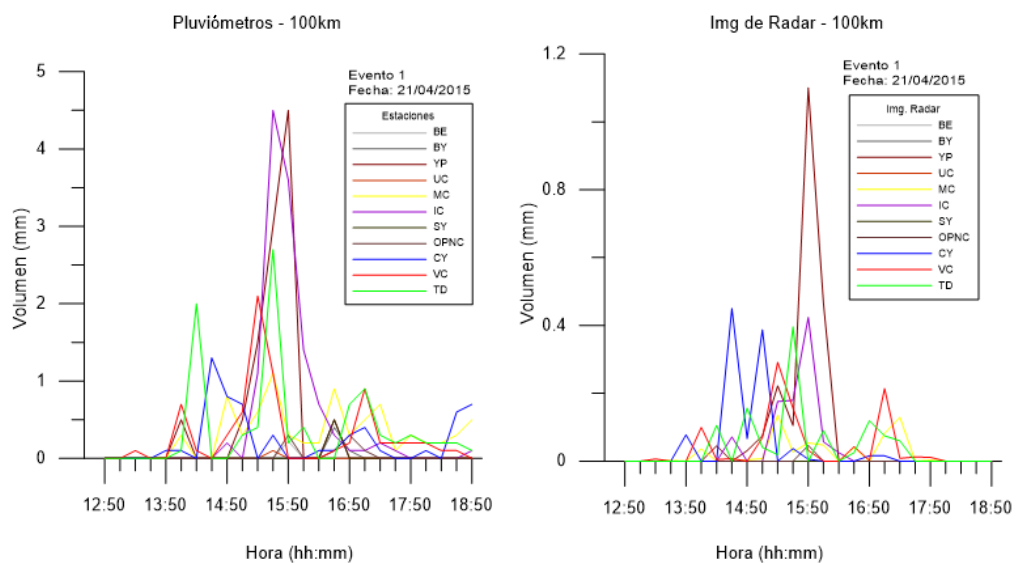


Figura 11. Distribución del Evento 1 de precipitación a intervalos de 15 minutos usando información pluviométrica frente a distribución de precipitación usando imágenes de radar meteorológico en el alcance de reflectividad de radar meteorológico de 100 km.

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA (2015) Realizado por: Autor

4.3. Estimaciones Resultado de las Interpolaciones

Los resultados de IDW más integración de imágenes de radar meteorológico son mostrados mediante imágenes en una escala temporal de 15 minutos del área de estudio donde las predicciones de precipitación son representadas por una escala de diferentes tonalidades que van desde el color azul que representan valor cero de precipitación hasta el color amarillo que varía según los valores de precipitación.

Las predicciones realizadas mediante el método de IDW más integración de imágenes de radar presentan una mejoría aceptable en comparación con las predicciones del método IDW, obteniendo como ventaja representar una mayor variabilidad espacial en la precipitación de la cuenca alta del río Paute. A continuación se presentan los mapas interpolados de los tres eventos seleccionados.

Evento 1

La Figura 12 presenta el evento 1 con resolución espacial de 100 m en el alcance de reflectividad del radar de 20 km, corresponde a la fecha 21/04/2015 15:50 en donde se produjo el pico más alto de precipitación. Se puede observar una comparativa visual entre las imágenes generadas usando el método de interpolación IDW (IDW pluvios) e IDW + Integración de imágenes (radar corr). En la figura se observa, en la parte superior la imagen de radar vs la interpolación de pluviómetros con el método de IDW, luego en la parte inferior se observa la corrección de superficie de imagen vs la integración de la imagen de radar meteorológico + IDW de los pluviómetros.

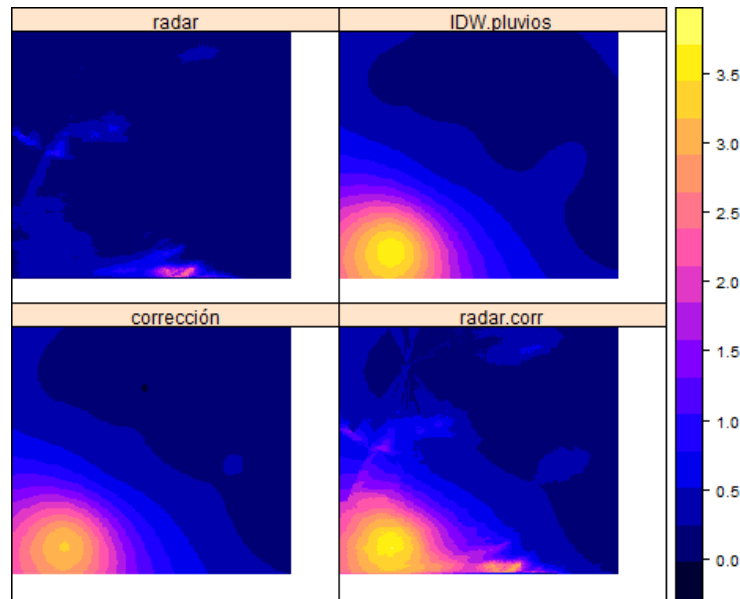


Figura 12. Estimación de Precipitación para el Evento 1 a una resolución espacial de 100 m en un alcance de reflectividad de 20km correspondiente a la fecha 21/04/2015 15:50 mediante IDW e IDW más integración de imágenes de radar meteorológico.

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA (2015) Realizado por: Autor

La Figura 13 presenta el evento 1 con resolución espacial de 250 m en el alcance de reflectividad del radar de 60 km, corresponde a la fecha 21/04/2015 15:50 en donde se produjo el pico más alto de precipitación. Se puede observar una mayor variabilidad espacial y cantidad de estimación de lluvia comparado con las imágenes generadas en los 20km.

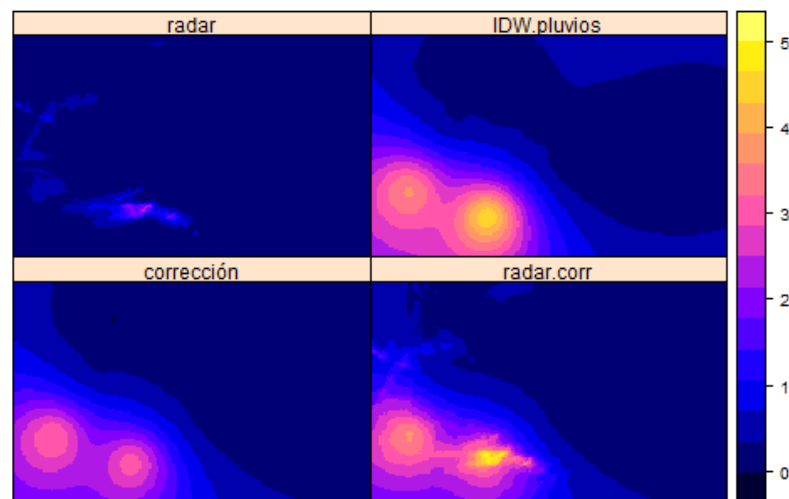


Figura 13. Estimación de Precipitación para el Evento 1 a una resolución espacial de 250 m en un alcance de reflectividad de 60km correspondiente a la fecha 21/04/2015 15:50 mediante IDW e IDW más integración de imágenes de radar meteorológico.

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA (2015) Realizado por: Autor

La Figura 14 presenta el evento 1 con resolución espacial de 500 m en el alcance de reflectividad del radar de 100 km, corresponde a la fecha 21/04/2015 15:50 en donde se produjo el pico más alto de precipitación. Se puede observar una mayor variabilidad espacial de la precipitación al presentar un mayor alcance, sin embargo, la resolución espacial es menor que en el alcance de 20 y 60 km.

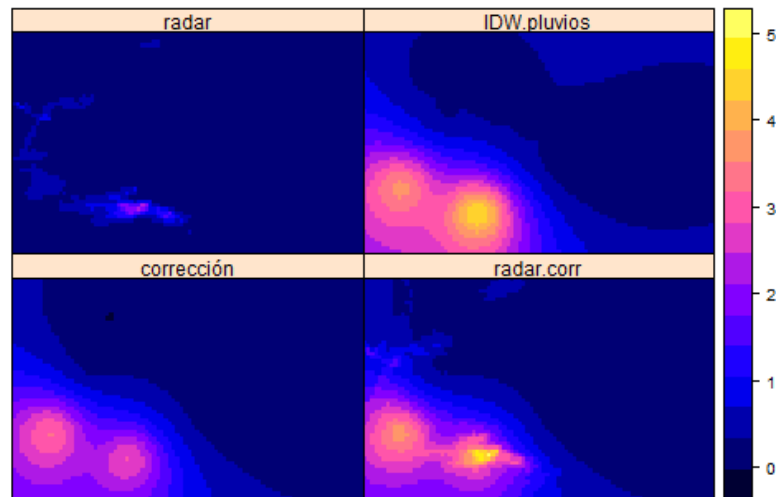


Figura 14. Estimación de Precipitación para el Evento 1 a una resolución espacial de 500 m en un alcance de reflectividad de 100km correspondiente a la fecha 21/04/2015 15:50 mediante IDW e IDW más integración de imágenes de radar meteorológico.

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA (2015) **Realizado por:** Autor

Los mapas muestran mayor variabilidad espacial al integrar dos fuentes de información sobre todo al usar una resolución espacial de 100m en 20 km. Como se observa en la Figura 12 al compararlo con las dos imágenes restantes de la Figura 13 y 14 en el alcance de 60 km y 100 km que utilizan una resolución de 250m y 500 m respectivamente, la variabilidad de las estimaciones a una resolución de 100 m se observa a mayor detalle.

Evento 2

Para el evento 2, al igual que con el evento 1, se realizó un análisis del escenario en donde se produjo el pico más alto de precipitación a 3 resoluciones espaciales: 100, 250, 500m en los diferentes alcances de reflectividad del radar: 20, 60 y 100 km, observamos una comparativa visual entre las imágenes generadas en los diferentes alcances de reflectividad del radar usando el método de interpolación IDW e IDW más integración de imágenes. Como era de esperarse en la Figura 15 de resolución de 100 m al

compararlo con las dos imágenes restantes de la Figura 16 y 17 en el alcance de 60 km y 100 km que utilizan una resolución de 250m y 500 m respectivamente se observa a mayor detalle la variabilidad de la estimación de la precipitación con una mejor resolución espacial.

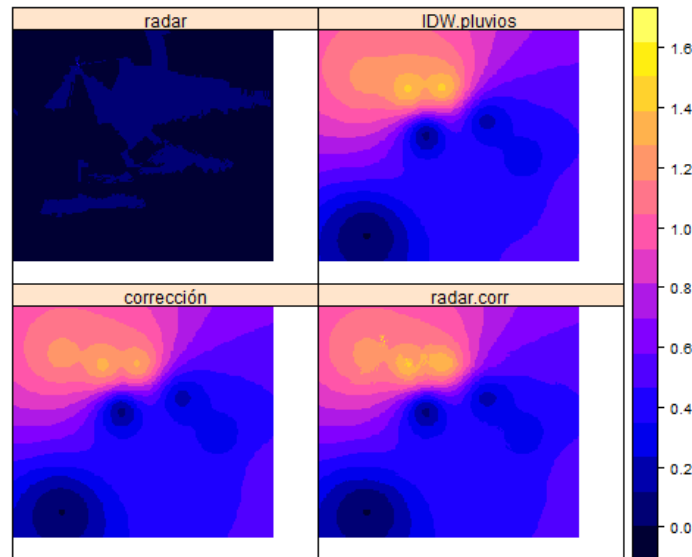


Figura 15. Estimación de Precipitación para el Evento 2 a una resolución espacial de 100 m en un alcance de reflectividad de 20km correspondiente a la fecha 26/04/2015 12:20 mediante IDW e IDW más integración de imágenes de radar meteorológico.

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA (2015) Realizado por: Autor

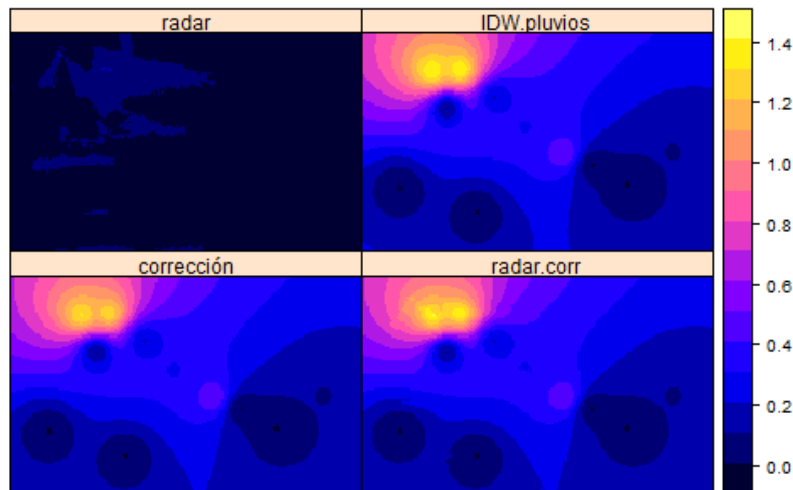


Figura 16. Estimación de Precipitación para el Evento 2 a una resolución espacial de 250 m en un alcance de reflectividad de 60km correspondiente a la fecha 26/04/2015 12:20 mediante IDW e IDW más integración de imágenes de radar meteorológico.

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA (2015) Realizado por: Autor

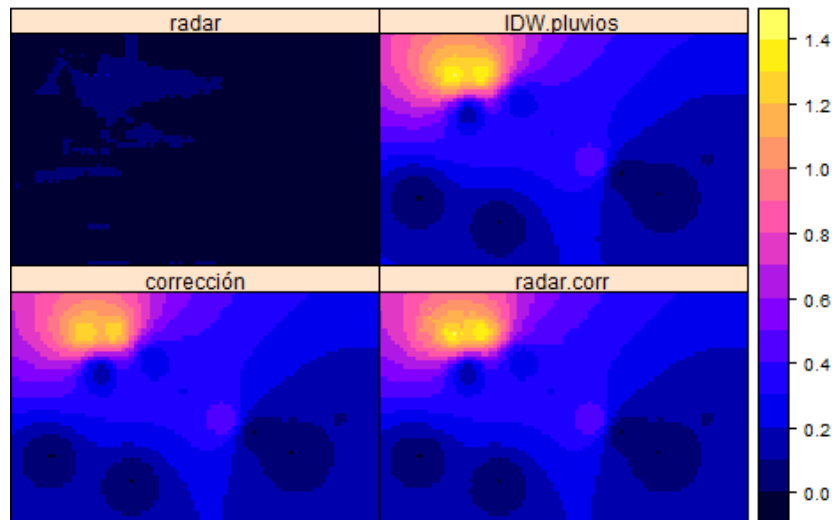


Figura 17. Estimación de Precipitación para el Evento 2 a una resolución espacial de 500 m en un alcance de reflectividad de 100km correspondiente a la fecha 26/04/2015 12:20 mediante IDW e IDW más integración de imágenes radar meteorológico.

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA (2015) **Realizado por:** Autor

Evento 3

Los resultados del proceso de interpolación IDW e IDW más integración de imágenes de radar meteorológico aplicado para el evento 3 presenta efectos similares al comparar el detalle de la variabilidad de la precipitación estimada en la resolución de 100 metros a 20 km de reflectividad del radar (Figura 18) frente a las imágenes generadas en el alcance de 60 km y 100 km que utilizan una resolución de 250m y 500 m (Fig. 19 y 20).

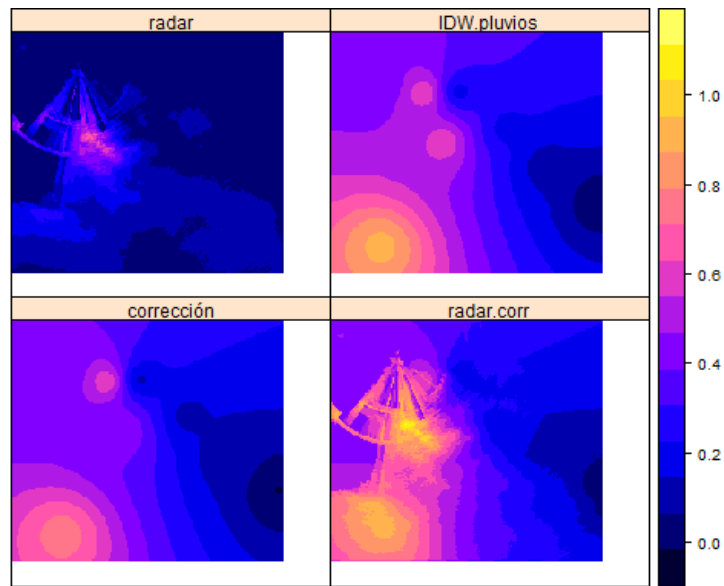


Figura 18. Estimación de Precipitación para el Evento 3 a una resolución espacial de 100 m en un alcance de reflectividad de 20km correspondiente a la fecha 03/05/2015 17:05 mediante IDW e IDW más integración de imágenes radar meteorológico.

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA (2015) Realizado por: Autor

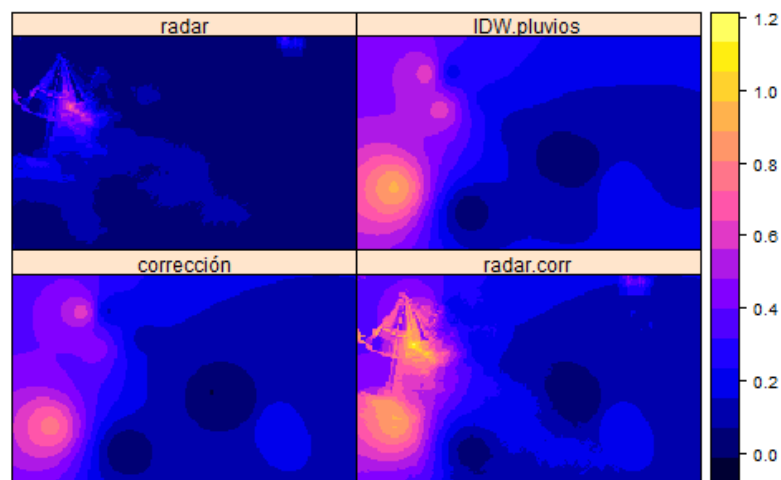


Figura 19. Estimación de Precipitación para el Evento 3 a una resolución espacial de 250 m en un alcance de reflectividad de 60km correspondiente a la fecha 03/05/2015 17:05 mediante IDW e IDW más integración de imágenes de radar meteorológico.

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA (2015) Realizado por: Autor

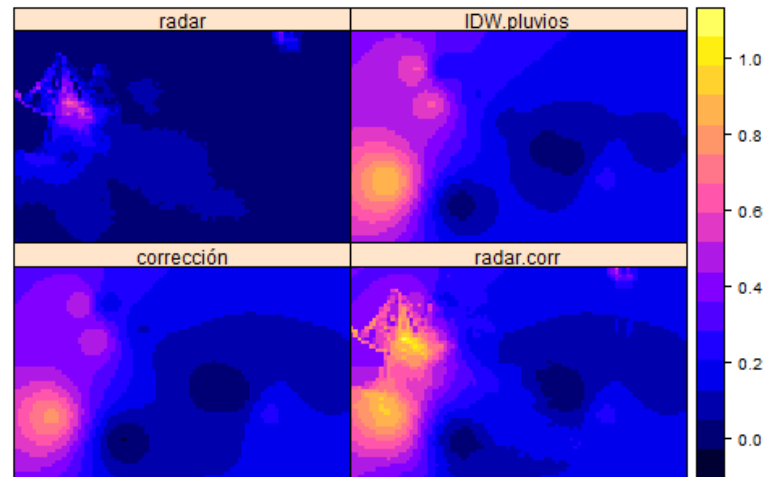


Figura 20. Estimación de Precipitación para el Evento 3 a una resolución espacial de 500m en un alcance de reflectividad de 100km correspondiente a la fecha 03/05/2015 17:05 mediante IDW e IDW más integración de imágenes de radar meteorológico.

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA (2015) **Realizado por:** Autor

El método de IDW más integración de imágenes de radar meteorológico presenta una superioridad aceptable en términos de visualización para mostrar una mayor variabilidad espacial de la precipitación en la Cuenca alta del río Paute, donde el número de pluviómetros disponibles es mínima. Los mapas generados por IDW muestran una distribución de áreas, dentro de estas áreas se presentan los denominados ojos de buey que corresponde a valores de lluvia altos o bajos y que no representan una continuidad espacial de la precipitación en el área de interpolación; éstos ojos de buey dan la apariencia de islas con información puntual que puede visualizarse como áreas cerradas no integradas a la continuidad del mapa generado, lo cual es una desventaja del método, sin embargo hay que reconocer que IDW tiene sus ventajas en la generación de mapas de precipitación con continuidad espacial integrando la información de los datos vecinos. Las imágenes generadas de los eventos 1, 2, 3 se encuentran en la sección de Anexo C en su totalidad.

4.4. Parámetros Resultados de la Validación Cruzada

Los estudios realizados por (Portalés, Boronat, Pardo, & Balaguer, 2010), (Mair & Fares, 2011), (Mutua, 2012), utilizan el método de interpolación IDW comparándolo con otros métodos de interpolación geoestadísticos (OK, UK, MRK) resultando el método de UK el que mejores estimaciones de

precipitación presenta al utilizar como covariable la topografía, cabe recalcar que éstos estudios se realizaron para la ciudad de Valencia, la isla de Hawai y la cuenca del río Nyando – Kenia que son lugares que se encuentran ubicados a una altura de no más de 800 metros sobre el nivel del mar, mientras el presente estudio se realizó en la cuenca alta del río Paute a una altura de más de los 2500 m.s.n.m en donde la precipitaciones varían espacialmente y temporalmente de una manera significativa por la presencia del sistema montañoso, sin embargo en este estudio se procedió a desarrollar la estimación de precipitación utilizando métodos geoestadísticos (OK, UK), resultando estimaciones de precipitación erróneas con sobreestimación de lluvia en las predicciones, ajuste erróneo de semivariogramas por la cantidad excesiva de valores cero de lluvia, resultando no factible el uso de éstos métodos de interpolación geoestadísticos a lo que se planteó como solución usar el método determinístico IDW y se observó la bondad que este provee con respecto a la estimación de la precipitación, y presentó mejoría al combinarlo con las imágenes de radar meteorológico como se observa en la siguiente sección de resultados de validación cruzada.

Las Tablas 9, 10 y 11 muestran los resultados de los valores promedios para la validación cruzada del evento 1. Teóricamente si el valor del Error Medio (ME) es cercano a cero las estimaciones de precipitación serían más precisas. Si consideramos únicamente este parámetro de validación, se puede indicar que el método más efectivo de interpolación para los eventos de precipitación 1, 2, 3 es IDW más integración de imágenes de radar meteorológico, debido a que posee el menor valor de ME en promedio comparado con el método de IDW. En cuanto a la raíz del error cuadrático medio (RSME), idealmente, si los valores son lo más cercano a cero entonces existe una mejor estimación. Considerando este parámetro de validación se puede señalar que el método de IDW más integración de imágenes de radar meteorológico es menor en los tres alcances de reflectividad (Tablas 9, 10 y 11). Finalmente si consideramos los valores del coeficiente de correlación (cor), mientras más cercano a 1 existe una mejor relación de los valores estimados con los valores observados. Se observa que existe una mejoría moderada en la correlación (Cor) entre las estimaciones y los datos originales de precipitación principalmente para el

método de IDW más integración de imágenes de radar meteorológico en los eventos de precipitación analizados. Observándose el mejor escenario de Cor para el alcance de reflectividad del radar de 100 km con un valor de Cor moderado de 0.47.

Tabla 9. Resultados de los parámetros de validación para el Evento 1 en un alcance de reflectividad del radar de 20 km a una resolución de 100m.

20 km	IDW	IDW + IMG. RADAR
ME	0.0029	0.0058
RSME	0.387	0.345
Cor	-0.029	0.324

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA

Realizado por: Autor

Tabla 10. Resultados de los parámetros de validación para el Evento 1 en un alcance de reflectividad del radar de 60 km a una resolución de 250m.

60 km	IDW	IDW + IMG. RADAR
ME	0.0204	0.0175
RSME	0.326	0.288
Cor	0.249	0.455

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA

Realizado por: Autor

Tabla 11. Resultados de los parámetros de validación para el Evento 1 en un alcance de reflectividad del radar de 100 km a una resolución de 500m.

100 km	IDW	IDW + IMG. RADAR
ME	0.020	0.017
RSME	0.32	0.28
Cor	0.24	0.47

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA

Realizado por: Autor

A continuación se presentan gráficos de dispersión para los valores de los parámetros considerados para el Evento 1 en el alcance de reflectividad de 20 km.

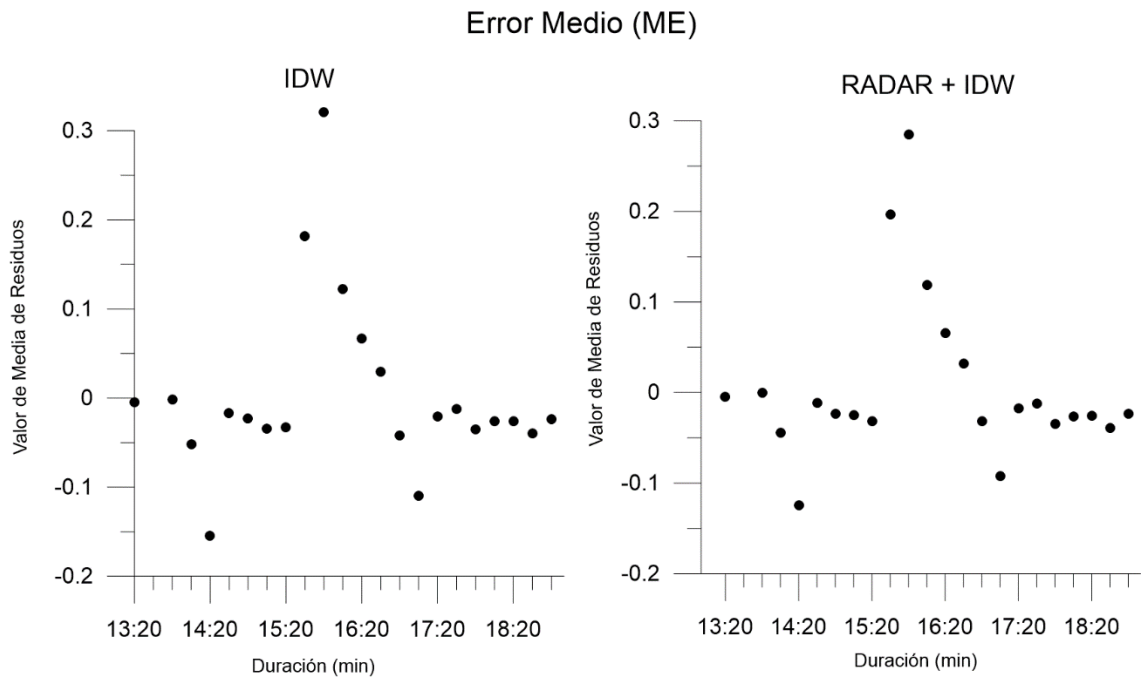


Figura 21. Medida del Error Medio para el Evento 1 en un alcance de reflectividad de 20 km mediante IDW vs IDW más integración de imágenes.

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA (2015) **Realizado por:** Autor

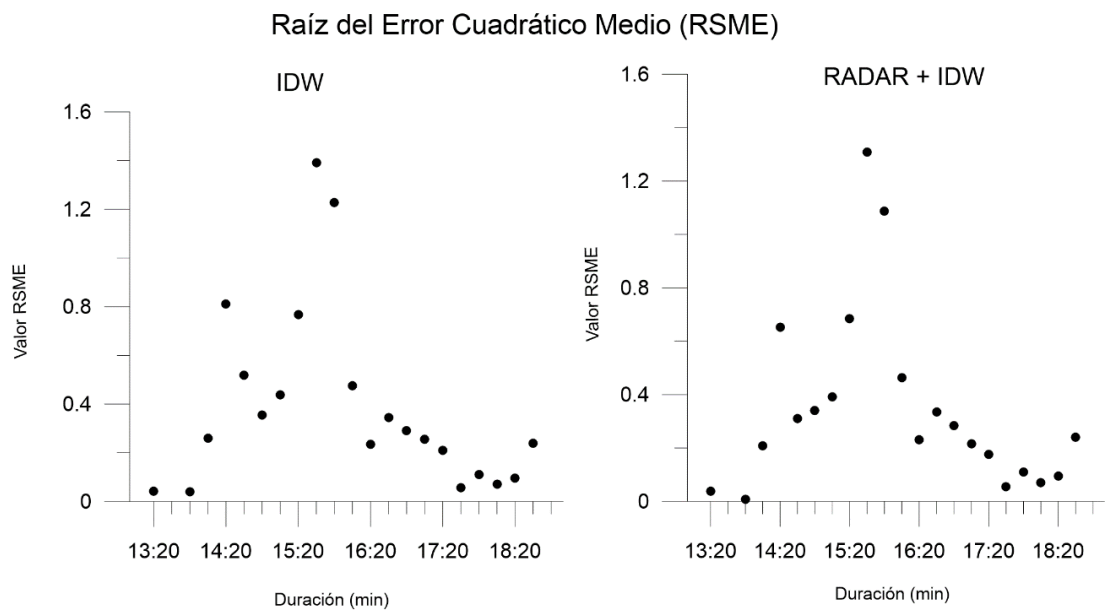


Figura 22. Medida de la Raíz del Error Cuadrático Medio para el Evento 1 en un alcance de reflectividad de 20 km mediante IDW vs IDW más integración de imágenes.

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA (2015) **Realizado por:** Autor

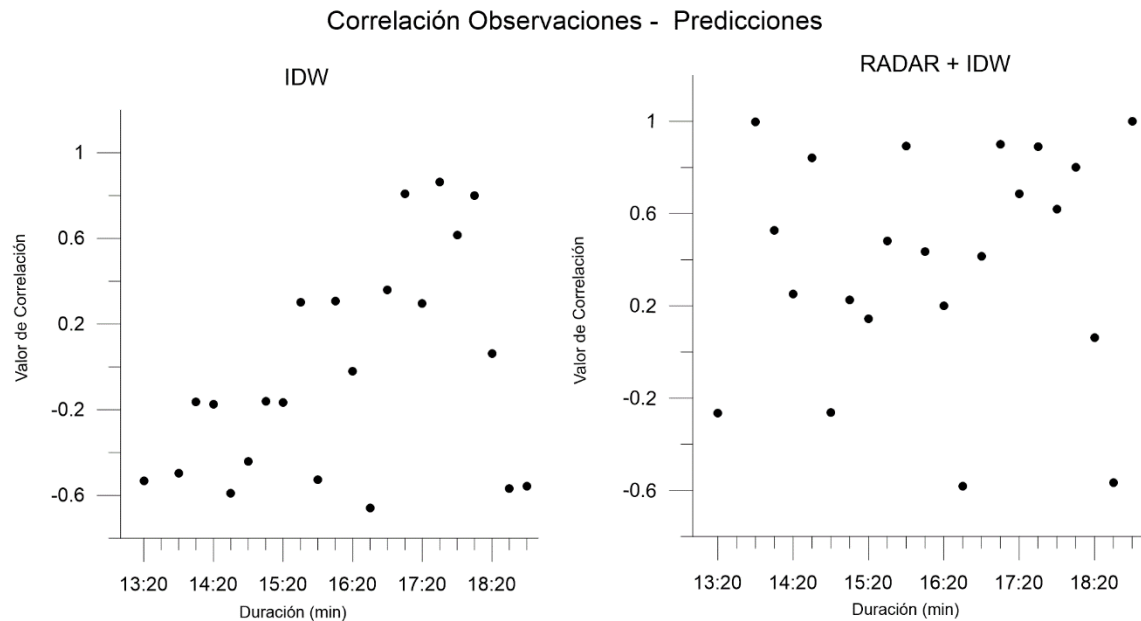


Figura 23. Medida de la Correlación entre Observaciones y las Predicciones para el Evento 1 en un alcance de reflectividad de 20 km mediante IDW vs IDW más integración de imágenes.

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA (2015) **Realizado por:** Autor

Según la Tabla 9, el evento 1 a resolución de 100 m en un alcance de reflectividad de 20 km presenta un valor elevado de 0.32 de correlación entre observaciones y predicciones de IDW más integración de imágenes con respecto al método IDW, si observamos la Figura 23 hace notario esta premisa. Para el resto de parámetros ME y RSME, se observa en la Figura 21 y 22 valores relativamente bajos lo más cercano a cero para el método IDW mas integración de imágenes con respecto al método IDW.

Gráficos de dispersión para los valores de los parámetros considerados para el Evento 1 en el alcance de reflectividad de 60 km.

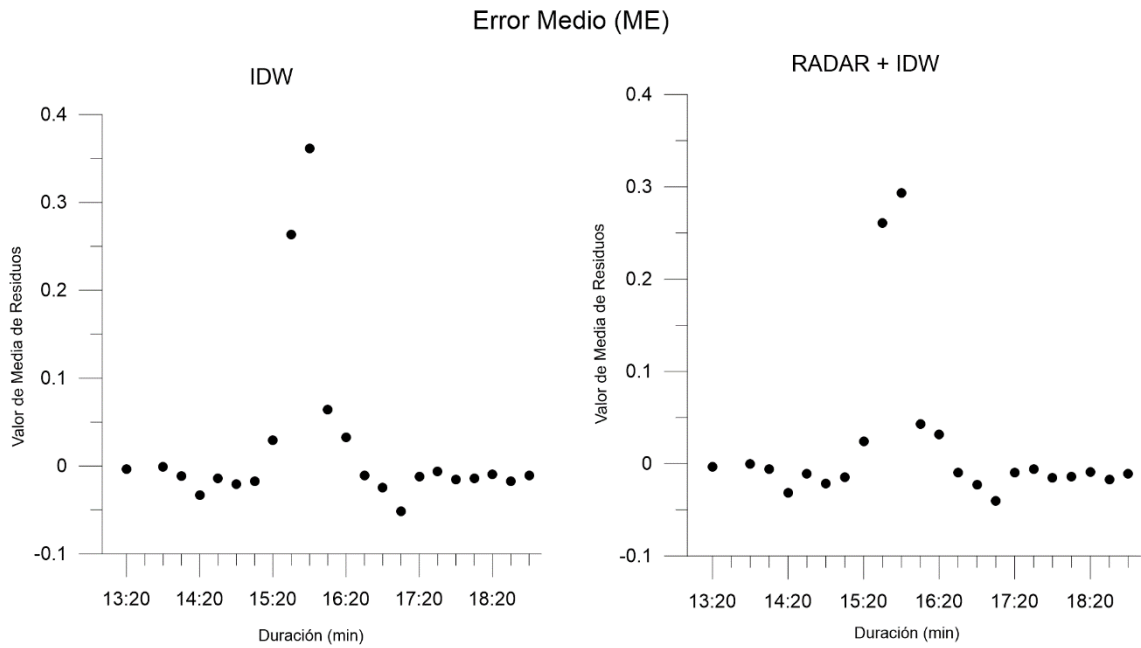


Figura 24. Medida del Error Medio para el Evento 1 en un alcance de reflectividad de 60 km mediante IDW vs IDW más integración de imágenes.

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA (2015) **Realizado por:** Autor

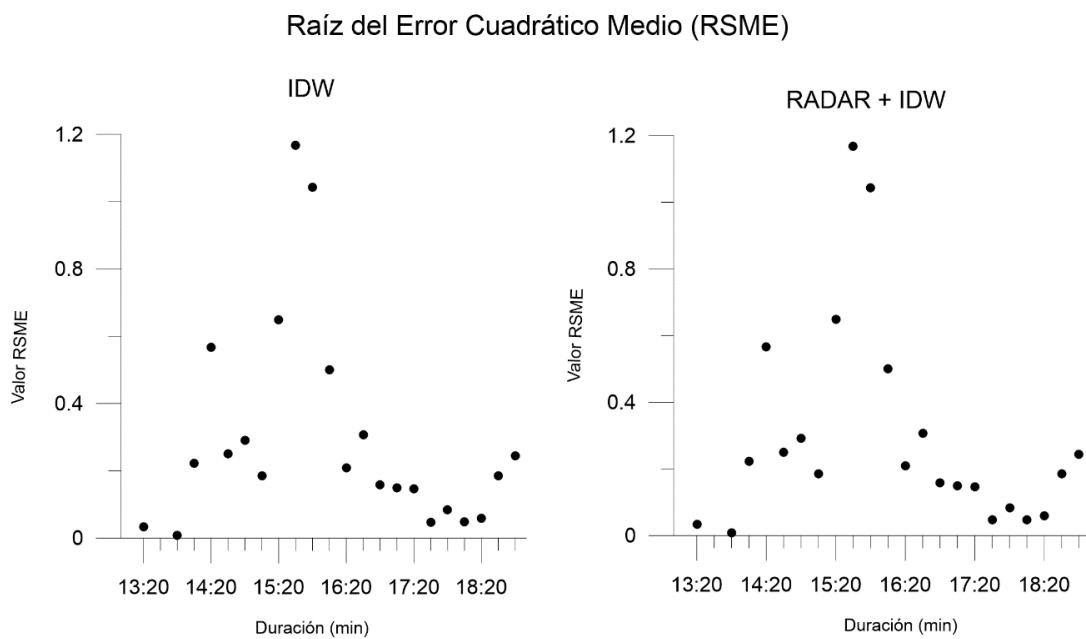


Figura 25. Medida de la Raíz del Error Cuadrático Medio para el Evento 1 en un alcance de reflectividad de 60 km mediante IDW vs IDW más integración de imágenes.

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA (2015) **Realizado por:** Autor

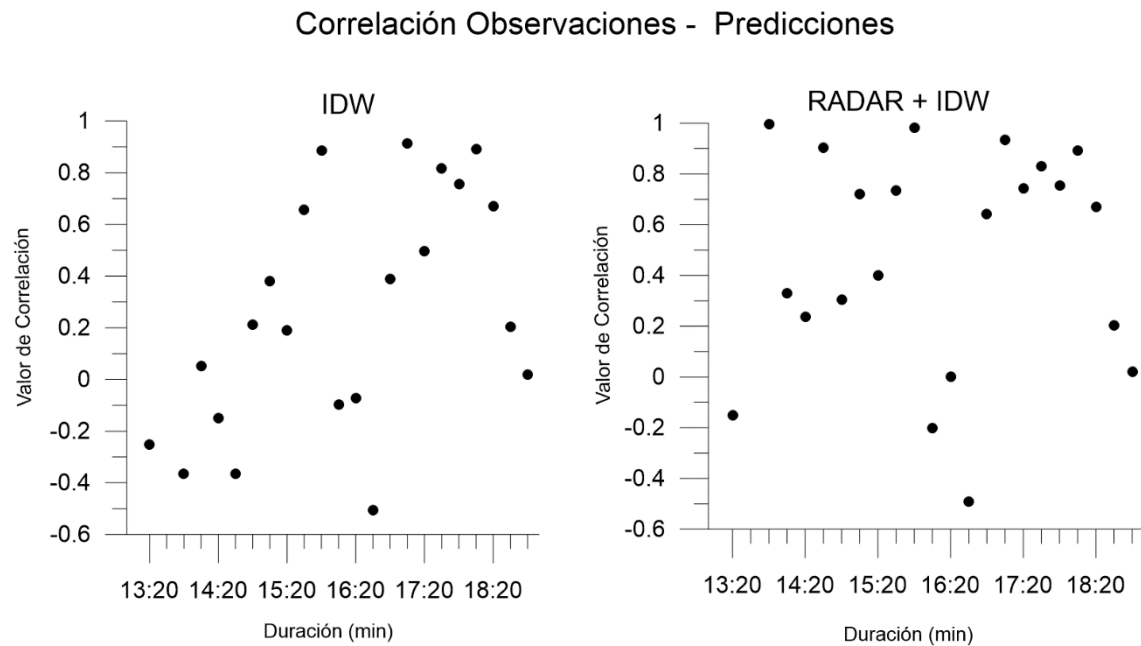


Figura 26. Medida de la Correlación entre Observaciones y las Predicciones para el Evento 1 en un alcance de reflectividad de 60 km mediante IDW vs IDW más integración de imágenes.

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA (2015) **Realizado por:** Autor

Según la Tabla 10, el evento 1 a resolución de 250 m en un alcance de reflectividad de 60 km presenta un valor elevado de correlación entre observaciones y predicciones de 0.45 de IDW más integración de imágenes con respecto al método IDW, además si observamos la Figura 26 se hace notario esta premisa. Para el resto de parámetros ME y RSME, se observa en las Figura 24 y 25 valores relativamente bajos lo más cercano a cero para el método IDW mas integración de imágenes con respecto al método IDW.

Gráficos de dispersión para los valores de los parámetros considerados para el Evento 1 en el alcance de reflectividad de 100 km.

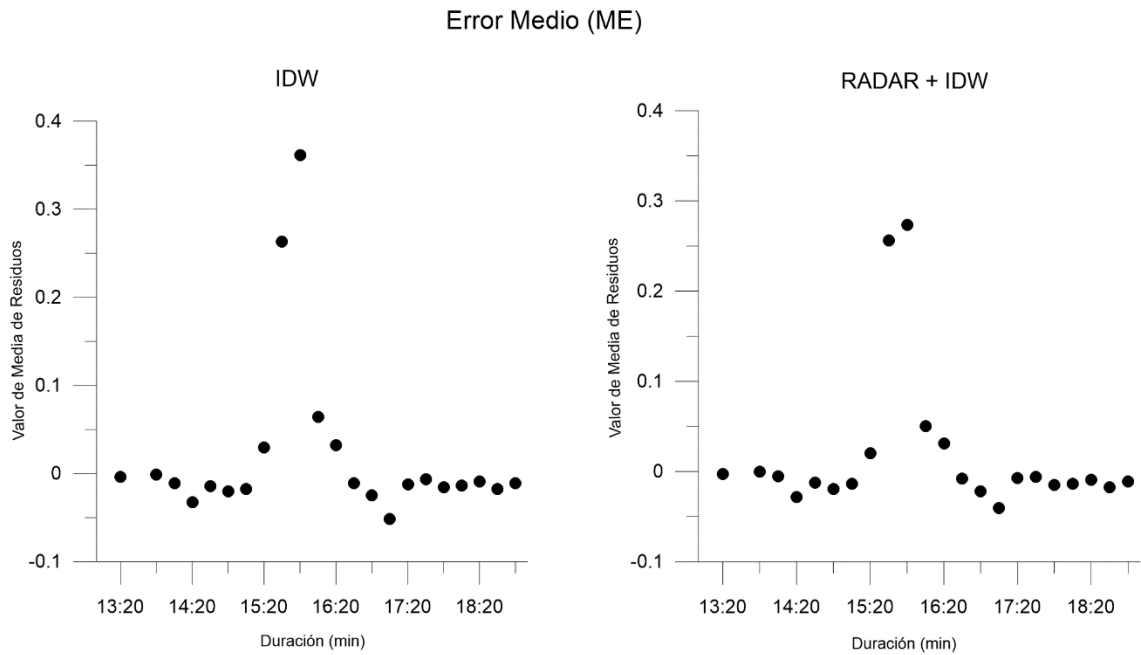


Figura 27. Medida del Error Medio para el Evento 1 en un alcance de reflectividad de 100 km mediante IDW vs IDW más integración de imágenes.

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA (2015)

Realizado por: Autor

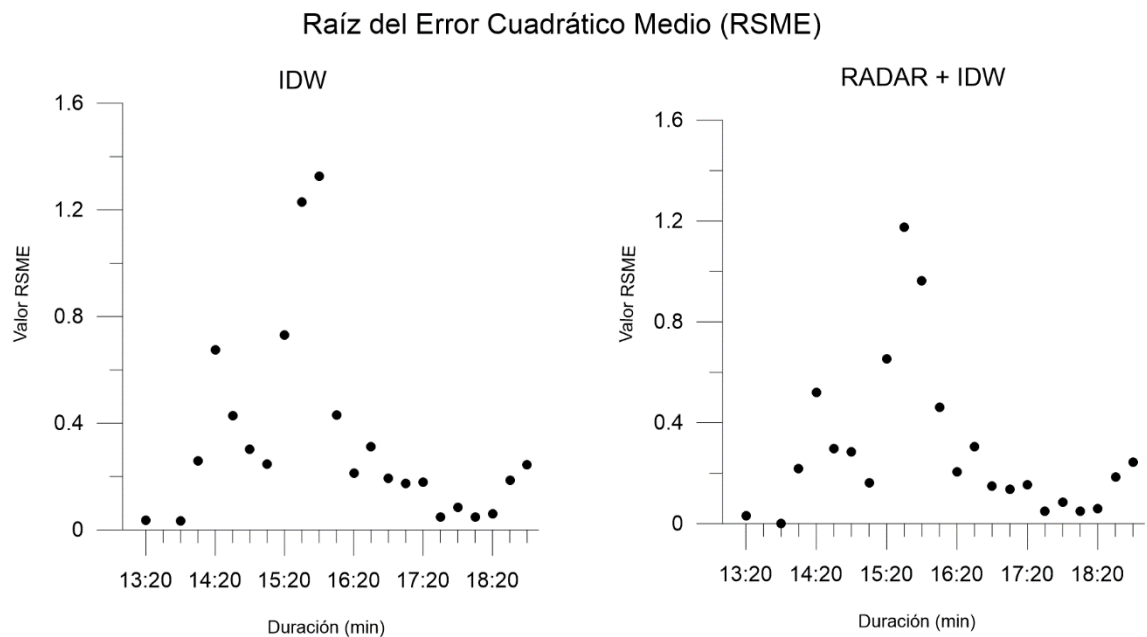


Figura 28. Medida de la Raíz del Error Cuadrático Medio para el Evento 1 en un alcance de reflectividad de 100 km mediante IDW vs IDW más integración de imágenes.

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA (2015)

Realizado por: Autor

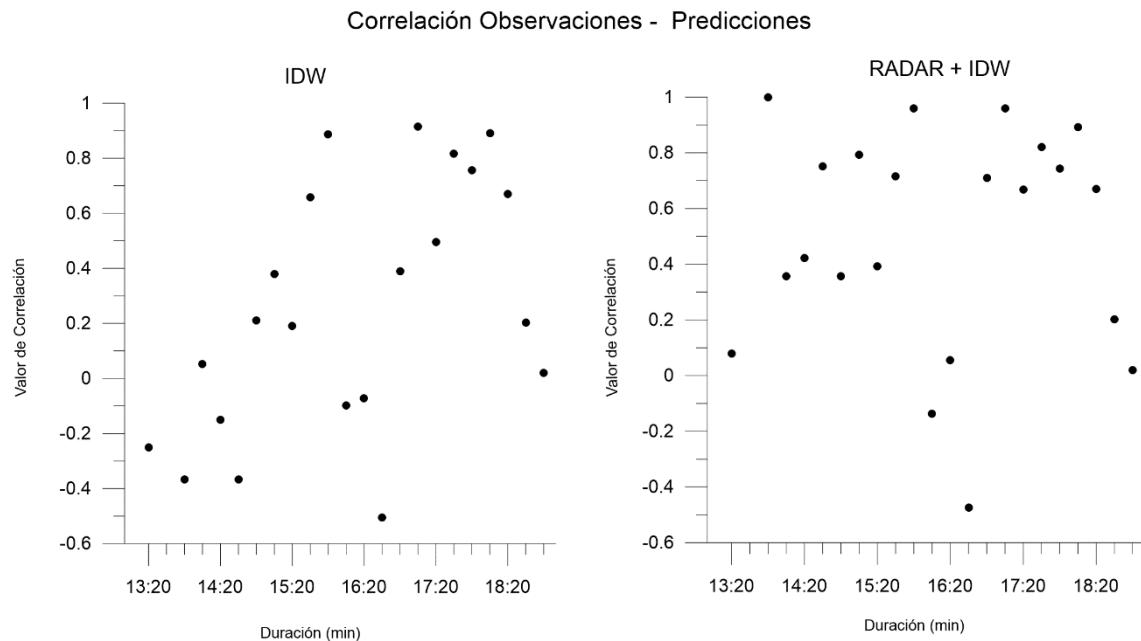


Figura 29. Medida de la Correlación entre Observaciones y las Predicciones para el Evento 1 en un alcance de reflectividad de 100 km mediante IDW vs IDW más integración de imágenes.

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA (2015) **Realizado por:** Autor

Según la Tabla 11, el evento 1 a resolución de 500 m en un alcance de reflectividad de 100 km presenta un valor elevado de correlación de 0.47, valor mayor a los análisis en resoluciones de 100m y 250m entre observaciones y predicciones de IDW más integración de imágenes con respecto al método IDW, además si observamos la Figura 29 hace notario esta premisa. Para el resto de parámetros ME y RSME, se observa en las Figuras 27 y 28 valores relativamente bajos lo más cercano a cero para el método IDW mas integración de imágenes con respecto al método IDW.

EVENTO 2

Las Tablas 12, 13 y 14 muestran los resultados globales para la validación cruzada del evento 2. De igual manera que con el evento 1 se observan valores cercanos a cero en el parámetro de Error Medio (ME) en el método de IDW mas integración de imágenes de radar meteorológico. En cuanto a la raíz del error cuadrático medio (RSME), idealmente, los valores presentados son bajos lo más cercano a cero en comparación con el método de IDW que posee

valores mayores. Para el parámetro de Cor presenta valores promedios relativamente bajos entre las estimaciones y los datos originales de precipitación, siendo el mejor escenario de correlación el alcance de reflectividad del radar de 100km como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 12. Resultados de los parámetros de validación para el Evento 2 en un alcance de reflectividad del radar de 20 km a una resolución de 100m.

20 km	IDW	IDW + IMG. RADAR
ME	-0.014	-0.013
RSME	0.132	0.130
Cor	-0.036	0.032

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA

Realizado por: Autor

Tabla 13. Resultados de los parámetros de validación para el Evento 2 en un alcance de reflectividad del radar de 60 km a una resolución de 250m.

60 km	IDW	IDW + IMG. RADAR
ME	-0.0056	-0.0053
RSME	0.125	0.123
Cor	0.196	0.231

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA

Realizado por: Autor

Tabla 14. Resultados de los parámetros de validación para el Evento 2 en un alcance de reflectividad del radar de 100 km a una resolución de 500m

100 km	IDW	IDW + IMG. RADAR
ME	-0.0056	-0.0052
RSME	0.125	0.122
Cor	0.196	0.232

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA

Realizado por: Autor

De igual manera, para el Evento 2 se presentan los gráficos de dispersión de los parámetros resultados de validación cruzada para los diferentes alcances de reflectividad del radar meteorológico 20 km, 60km y 100 km (Anexo D).

EVENTO 3

Con el mismo criterio se concluyó que para el Evento 3, el método de IDW más integración de imágenes de radar meteorológico presentó valores promedio cercanos a cero de Error Medio (ME) al igual que la raíz del error cuadrático medio (RSME) comparado con el método IDW; como se observa en las Tablas 15, 16 y 17. Al contemplar el valor de correlación entre observación y predicciones para IDW e IDW más IMAG DE RADAR, el presente evento

muestra una elevación moderada con la integración de imágenes de radar, siendo el mejor escenario en el alcance de 20km a resolución de 100m con un valor de 0.248

Tabla 15. Resultados de los parámetros de validación para el Evento 3 en un alcance de reflectividad del radar de 20 km a una resolución de 100m.

20 km	IDW	IDW + IMG. RADAR
ME	-0.009	-0.006
RSME	0.374	0.332
Cor	-0.037	0.248

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA

Realizado por: Autor

Tabla 16. Resultados de los parámetros de validación para el Evento 3 en un alcance de reflectividad del radar de 60 km a una resolución de 250m.

60 km	IDW	IDW + IMG. RADAR
ME	0.016	0.011
RSME	0.705	0.653
Cor	0.029	0.230

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA

Realizado por: Autor

Tabla 17. Resultados de los parámetros de validación para el Evento 3 en un alcance de reflectividad del radar de 100 km a una resolución de 500m.

100 km	IDW	IDW + IMG. RADAR
ME	0.016	0.013
RSME	0.705	0.227
Cor	0.029	0.227

Fuente: ETAPA EP – iDRHICA

Realizado por: Autor

De igual manera, para el Evento 3 se presentan los gráficos de dispersión de los parámetros resultados de validación cruzada para los diferentes alcances de reflectividad del radar meteorológico 20 km, 60km y 100 km (Anexo D).

Según Abad (2014) en su estudio “Estimación de la precipitación espacial mediante correlación con variables secundarias y la ayuda de tecnologías de información geográficas”, si se trata de estimar la precipitación espacial en valores medios los métodos geoestadísticos serían los indicados, pero si se tratara de estimar superficies de precipitación de eventos extremos (mínimos o máximos), una estimación por defecto o exceso puede tener efectos graves sobre la posterior utilización de los resultados, por lo que en estos casos a pesar de que IDW pueda no ser el método con mejores estadígrafos en su

validación, este dará mejores resultados por cuanto su estimación se encuentra dentro del rango de valores de las estaciones de medición utilizadas en la interpolación.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Este estudio tuvo por objetivo evaluar el método de interpolación IDW (Inverse Distance Weight), para integrar la información de precipitación procedente de imágenes de radar meteorológico CAXX con la información de las estaciones pluviométricas distribuidas a lo largo de la cuenca alta del río Paute y originar una óptima estimación de la precipitación. En primer lugar, se ha observado la importancia que tiene el uso de imágenes de radar meteorológico como covariable en el proceso de interpolación, además de que en el proyecto resultó el método que mejor se ajusta y estima la precipitación en la cuenca.

Se analizaron dos métodos de interpolación: IDW (Inverse Distance Weight) e IDW más integración de imágenes de radar meteorológico. Las evaluaciones de la validación cruzada muestran que el mejor método de estimación de precipitación corresponde a IDW más integración de imágenes de radar meteorológico, que presenta una disminución en los parámetros estadísticos propuestos (ME, RMSE y COR) con respecto al método IDW. Sin embargo, el método de IDW muestra una predicción espacial de precipitación aceptable, teniendo en cuenta que las imágenes de radar meteorológico CAXX proporcionadas se encuentran en un estado de procesamiento inicial, y que requieren mayores estudios para lograr la calibración.

Por otro lado, este estudio se enfocó en la implementación y ejecución de un código que permita la transformación de las imágenes crudas receptadas por el radar a los valores de taza de lluvia usados en los análisis de interpolación y estimación de la precipitación espacial. En este contexto automatizar herramientas para el análisis de la precipitación ayudaría para la gestión y planificación del agua en la actualidad y en el futuro, tomando en cuenta el cambio de clima inminente.

5.2. Recomendaciones:

- Se recomienda que para los estudios posteriores, se amplíe el período de tiempo de análisis en escalas temporales de una hora, diaria y mensual.
- Usar métodos de interpolación geoestadísticos pueden significar un gran desarrollo para estimar la variabilidad espacial y temporal de la precipitación, en el caso de que la base de datos cuente con una mayor variabilidad en valores registrados de lluvia, además se puede utilizar otras covariables como temperatura, humedad, nubosidad, viento, orografía etc, a parte de las imágenes de radar meteorológico.
- Se recomienda utilizar técnicas geoestadísticas en estudios en escalas pequeñas (subcuencas o microcuencas) o para proyectos de riego, en donde se pretenda entender la variabilidad interna dentro de una cuenca, debido a que la cantidad de precipitación es influenciada por los efectos locales y orográficos.
- Para escalas grandes, por ejemplo toda una cuenca de análisis, no haría falta usar métodos complejos como los geoestadísticos para obtener el valor de precipitación media horaria, mensual y anual en su área, el método IDW se ajusta correctamente.

6. REFERENCIAS

- Abad, I. O. (2014). Estimación de precipitación espacial mediante correlación con variables secundarias y la ayuda de tecnologías de información geográfica. Universidad de Cuenca.
- Astudillo, P. X., Tinoco, B. a, & Siddons, D. C. (2015). The avifauna of Cajas National Park and Mazán Reserve, southern Ecuador, with notes on new records. *Cotinga*, 37(December), 1–11.
- Berndtsson, R., & Niemczynowicz, J. (1988). Spatial and temporal scales in rainfall analysis - some aspects and future perspectives. *Journal of Hydrology*, 100, 293–313.
- Bisquerra, R. (1989). Introducción conceptual al análisis multivariable. Barcelona, España: PPU.
- Bosque Sendra, J. (2000), *Sistemas de Información Geográfica*, Ediciones Rialp, Madrid.
- Buytaert, W., Célleri, R., Willems, P., Bièvre, B. De, & Wyseure, G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology*, 329(3-4), 413–421. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.02.031
- Calheiros, R., & Zawadzki, I. (1987). Reflectivity- rain rate relationships for radar hydrology in Brazil. *J. Clim_Aple_Met*, 118-132.
- Casas, M. C., & Alarcón, M. (1999). *Meteorología y clima* (p. 155).
- Célleri, R. (2007). Rainfall variability and rainfall-runoff dynamics in the Paute River Basin – Southern Ecuadorian Andes. Heverlee, Belgica: Katholieke Universiteit Leuven.
- Célleri, R., Willems, P., Buytaert, W., & Feyen, J. (2007). Space – time rainfall variability in the Paute Basin, Ecuadorian Andes. *Hydrological Processes*, 21, 3316–3327. doi:10.1002/hyp
- Chappell, Adrian, Luigi H. Renzullo, Tim J. Raupach, and Malcolm Haylock. 2013. “Evaluating Geostatistical Methods of Blending Satellite and Gauge Data to Estimate near Real-Time Daily Rainfall for Australia.” *Journal of Hydrology* 493:105–14. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.04.024>).

- Chow, V. Te, Maidment, D. R., Mays, L. W., Saldarriaga, J. G., & Santos, G. R. (1994). *Hidrología Aplicada*. (M. E. Suárez R., Ed.). Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana, S.A.
- Díaz Viera, M. A. (2002). *Geoestadística Aplicada*. (U. Instituto de Geofísica, Ed.).
- Delgado, O., López, F., Aguilar, M., & Cordero, M. (2006). *Componente geomorfología glaciar del Parque Nacional Cajas – Ecuador*. Unpublished Report, Universidad (Cuenca-Ecuador).
- FAO, (2001). *Manual Cueso Análisis Espacial Arcview 8.2*. Obtenido de <http://www.rlc.fao.org/proyecto/139jppn/documento/2ordenam/talleres/tfa oae/doctae/mmae.pdf>
- Guan, H., Wilson, J., & Makhnin, O. (2005). Geostatistical mapping of mountain precipitation incorporating autoserched effects of terrain an climatic characteristics. *Journal of Hydrometeorology* , 10181031.
- Giraldo, R. (2002). *Introducción a la geoestadística: Teoría y aplicación*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Goudenhoofdt, E., & Delobbe, L. (2009). Evaluation of Radar- Gauge Merging Methods for Quantitative Precipitation Estimates . *Hydrology and Earth System*.
- Goovaerts, P. (1997), *Geostatistics for natural resources evaluation*, Oxford University Press, New York.
- Goovaerts, P. (2000). Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology*, 228(1-2), 113–129. doi:10.1016/S0022-1694(00)00144-X
- Guevara, D., & J. (1987). *Métodos de estimación y ajustes de datos climáticos* Caracas Universidad Central de Venezuela.
- Haberlandt, Uwe. 2007. “Geostatistical Interpolation of Hourly Precipitation from Rain Gauges and Radar for a Large-Scale Extreme Rainfall Event.” *Journal of Hydrology* 332(1-2):144–57.
- Hill, Christopher, D., Firoz, V., & Curt, B. (2010). *Guia de Referencia para Sistemas de Alerta Temprana de Crecidas Repentinas*.
- Hutchinson, M. F. (1988), “Calculation of hydrologically sound digital elevation models”, in *Proceedings of the Third International Symposium on Spatial Data Handling*, 17-19 August, Sydney, Australia, International Geographical Union, Ohio, pp. 117-133.

- Hrachowitz, M., & Weiler, M. (2010). Uncertainty of precipitation estimates caused by sparse gauging networks in a small, mountainous watershed. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(5), 460-471.
- INAMHI: Atlas Estudiantil, [online] Available from: http://issuu.com/inamhi/docs/atlas_estudiantil, 2013.
- Johnston, K., Ver Hoef, J. M. ., Krivoruchko, K., & Lucas, N. E. (2003). Using ArcGIS Geostatistical Analyst.
- Joss, J., Waldvogel, A., & Zawadzki, I. (1997). Raindrop size distribution again. In *Preprints, 28th Conf. on Radar Meteorology*, Austin, TX, Amer. Meteor. Soc (pp. 326-327).
- Krajewski, W. F., & Ciach, G. J. (2003). An analysis of small-scale rainfall variability in different climatic regimes. *Hydrological Sciences - Journal - Des Sciences Hydrologiques*, 48(April), 151–162.
- Kravchenko A, Bullock D.G. (1999). A Comparative study if interpolation methods for mapping soil properties. *Agronomy Journal* 91:393-400.
- Kravchenko A, (2003). Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. *Soil Science Society of American Journal* 67:1564-1571.
- Konrad, C. (1996). Relationships between precipitation event types and topography in the Southern Blue Ridge Mountains of the Southeastern USA. *International Journal of Climatology* , 49-62.
- Lozano Z., Bravo C., Ovalles F., Hernandez R.M., Moreno B., Pinango L., Villanueva J.G. (2004). Selección de un diseño de muestreo en parcelas experimentales a partir del estudio de la variabilidad espacial de los suelos. *Bioagro* 16(1):1-17.
- Padrón, F. (2013). Análisis de la estructura de la lluvia de páramo. Universidad de Cuenca. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/519>
- Parrilla Alcalá, E., & Ojeda Zújar, J. (2005). Análisis de regresión y la interpolación espacial en el estudio de episodios de precipitaciones diarias en la Cuenca del Retortillo. *Memorias del X Coloquio Ibérico de Geografía* .
- Mair, A., & Fares, A. (2011). Comparison of rainfall interpolation methods in a mountainous region of a tropical island. *Journal of Hydrologic Engineering* , 371-383.
- Maune, D. F., S. M. Kopp, C. A. Crawford and C. E. Zervas (2001), "Introduction", in Maune, D. F. (coord.), *Digital elevation model*

- technologies and applications: the DEM users manual, The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Maryland, pp. 1-34.
- Manz, Bastian et al. 2016. "High-Resolution Satellite-Gauge Merged Precipitation Climatologies of the Tropical Andes." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
- Marshall, J. S., & Palmer, W. M. K. (1948). The distribution of raindrops with size. *Journal of meteorology*, 5(4), 165-166
- Minga, D., & Verdugo, A. (2007). Riqueza florística y endemismo del Parque Nacional Cajas. Unpublished Report, Herbario A(Cuenca-Ecuador).
- Mounier, F., P. Lassegues, a. L. Gibelin, J. P. Ceron, and J. M. Veysseire. 2012. "Radar-Guided Control and Interpolation of Rain-Gauge Precipitation Data over France." 49 pp.
- Mora, D., Liu, T., Cisneros, F., Wyseure, G., & Willems, P. (2012). Statistical Analysis on the Performance of Global and Regional Climate Models for the Paute River Basin in the South-Ecuadorian Andes. En *Proceedings of 10th International Conference on Hydroinformatics, Hamburg, Germany*.
- Moshinsky, & M, R. (1995). Fundamentos de radares Meteorológicos: Aspectos Clásicos. *Ingeniería Hidráulica en Mexico*, 55-74.
- Mutua, F. (2012). A comparison of spatial rainfall estimation techniques: A case study of Nyando river basin Kenya. *JAGST, Jomo Kenyatta University of Agriculture and Technology* , 95-112.
- Pardo, E. (1998). Comparison of geostatistical methods for estimating the areal average climatological rainfall mean using data on precipitation and topography. *International Journal of Climatology* , 1031-1047.
- Pérez Vega, A. y J.-F. (2009), "Evaluación de los errores de modelos digitales de elevación obtenidos por cuatro métodos de interpolación", *Investigaciones Geográficas, Boletín, núm. 69, Instituto de Geografía, UNAM, México*, pp. 53-67.
- Portalés, C., Boronat, N., Pardo, J., & Balaguer, A. (2010). Seasonal precipitation interpolation at the Valencia region with multivariate methods using geographic and topographic information. *International Journal of Climatology* , 1547-1563.
- Pourrut, Rovere, Romo, & Villacrés. (1995). Clima del Ecuador. Retrieved February 1, 2017, from http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/divers2/010014827.pdf rainfall over small areas using high density raingages and radar. *J. Appl. Met.* 18.



- Rodríguez, R., Capa, Á., & Lozano, A. (2004). Meteorología y Climatología. In Meteorología y Climatología.
- Ruiz, J. J. (2009). Evaluación de Diferentes Metodologías Para La Sciences Discussions 13:195 - 203. *Sudamérica "Revista Brasileira de Meteorología"*, 24: 473-88.
- Sánchez Rafael, D. C. (2014). Curso de Postgrado de Climatología aplicada: El Radar Meteorológico y sus Aplicaciones Hidrológicas. Retrieved May 2, 2017, from http://www.crahi.upc.edu/curs/html_pages/trasp5.html
- Serrano, V., Sánchez, S., & Cuadrat, J. (2003). Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley (Spain): application to annual precipitation and temperature. *Climate research*, 24, 161-180.
- Tapiador, F., Hou, A., de Castro, M., Checa, R., Cuartero, F., & Barros, A. (2011). Precipitation estimates for hydroelectricity. *Energy & Environmental Science*, 4(11), 4435-4448.
- Tveito, O., & Schöner, W. (2002). Application of spatial interpolation of climatological and meteorological elements by the use of geographical information systems (GIS). *Klima Report No. 28/02*.
- Vallejo, C. (2014). *Análisis de las crecidas presentadas en los ríos Tarqui, Yanuncay y Tomebamba desde 1997 hasta 2011*. Universidad de Cuenca. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/5494>
- Wise, S. (2000), "Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours", *Hydrological Processes*, no. 14, pp. 1909-1929.
- Webster, R., & Oliver, M. (2007). *Geostatistics for Environmental Scientists* (Second Edi., p. 333). John Wiley & Sons, Ltd.
- Zawadzki, I. (1984). Factors affecting the precision of radar measurements of rain. In Conference on Radar Meteorology, 22 nd, Zurich, Switzerland (pp. 251-256).

7. ANEXOS

Anexo A: Script Implementado en R

Algoritmo en R para extraer las estimaciones del radar meteorológico en la grilla correspondiente a cada estación pluviométrica.

```
# CARGAR LAS LIBRERIAS REQUERIDAS
```

```
library(raster)
library(sp)
library(dplyr)
library(rtiff)
library(pixmap)
library(rgdal)
#library(doMC)
#library(doSNOW)
library(stringr)
library(foreach)
library(doParallel)
library(gdata)
```

```
#TRANSFORMACIÓN Z-R TAZA DE PRECIPITACIÓN DE NATURALEZA FUERTE
```

```
start_task <- Sys.time()
```

```
#a and b parameters from Z-R relation fuerte
```

```
#a <- 235
```

```
#b <- 1.2
```

```
#dirTiffsDia = "C:/r_resultados_fuerte/resultados/tiffsDia"
```

```
#dirTiffsHora = "C:/r_resultados_fuerte/resultados/tiffsHora"
```

```
#dirTiffsConjuntoDia = paste(dirTiffsDia, "/conjunto", sep="")
```

```
#dirTiffsConjuntoHora = paste(dirTiffsHora, "/conjunto", sep="")
```

```
#dirShp = "C:/r_resultados_fuerte/resultados/shp"
```

```
#dirsDatosRadar = c(c(),
```

```
  #"C:/r_resultados_fuerte/imagenesValidadas/100kmCaxx.ppi",
```

```
  #"C:/r_resultados_fuerte/imagenesValidadas/60kmCaxx.ppi",
```

```
  #"C:/r_resultados_fuerte/imagenesValidadas/20kmCaxx.ppi",
```

```
  #c())
```

```
start_task <- Sys.time()
```

```
n.cores=detectCores()
```

```
#cl<-makeCluster(n.cores)
```

```
#registerDoParallel(cl)
```

```
#registerDoMC(cores=n.cores)
```

```
cluster<-makeCluster(n.cores) #<- # of processors / hyperthreads on machine
```

```
registerDoParallel(cluster)
```

```
#registerDoSNOW(cluster)
```

```
#PROCESAR TODOS LOS DIRECTORIOS DE IMÁGENES DE RADAR PARA  
OBTENER SUS VALORES DE ACUERDO A LOS PUNTOS DE CADA  
ESTACIÓN.
```

```
proc=foreach (dir = dirsDatosRadar) %dopar% {  
  #for (dir in dirsDatosRadar) {  
    library(raster)  
    procesarImagDir(dir)  
    dir  
  }  
  stopCluster(cluster)  
  end_task <- Sys.time () - start_task  
  end_task
```

```
#OBTENER EL NOMBRE DE LA RUTA QUE SE VA A PROCESAR.
```

```
strTamanio = basename(dirImgRadarPorFecha)  
directorios <- list.dirs(path = dirImgRadarPorFecha, recursive = FALSE,  
full.names = TRUE)  
listaArchivosTif  
listaFechasArchivos = NULL  
for (i in 1:length(directorios))
```

```
files <- list.files(path=directorios[i], pattern='.tif', full.names = TRUE)  
  for (j in 1:length(files))  
listaArchivosTif = c(listaArchivosTif, files[j]) tif  
  fileName = basename(files[j]) #obtener solo el nombre del archivo  
  strOnlyDate = substr(fileName, 1, 12)  
  fecha = as.POSIXct(strptime(strOnlyDate, "%Y%m%d%H%M"), tz = "GMT")  
#transformar el texto a fecha, indicando que se trata de zona horaria GMT  
  attr(fecha, "tzone") <- "America/Guayaquil" #transformar la zona horaria a la  
de Ecuador (puesto que los datos originales están en zona horaria GMT)
```

```
#AGREGAR LA FECHA A LA LISTA DE FECHAS.
```

```
if (is.null(listaFechasArchivos)) {  
  listaFechasArchivos = fecha  
  } else {  
    listaFechasArchivos = c(listaFechasArchivos, fecha)  
  }  
}  
}
```

```
#CREAR UN DATA FRAME QUE CONTENGA LA LISTA DE ARCHIVOS Y LA  
FECHA A LA QUE PERTENECEN.
```

```
dfDataFiles = data.frame(file=listaArchivosTif, date = listaFechasArchivos,  
hourGroup = -1, dayGroup = -1)  
dfDataFiles=dfDataFiles[complete.cases(dfDataFiles),]  
dfDataFiles = dfDataFiles[order(dfDataFiles$date),]
```

```
#GENERAR LOS IDS PARA CADA FILA.
```

```
dfDataFiles = generateDateGroupIds(dfDataFiles, "date")  
columnOfId = "hourGroup"  
destinationTif = paste(dirTiffsHora, "/", strTamanio, sep="")  
destinationTifSet = paste(dirTiffsConjuntoHora, "/", strTamanio, sep="")  
dir.create(destinationTif, showWarnings = FALSE)  
dir.create(destinationTifSet, showWarnings = FALSE)  
generateAcumAndSetTifs(dfDataFiles, columnOfId, destinationTif,  
destinationTifSet)
```

```
columnOfId = "dayGroup"  
destinationTif = paste(dirTiffsDia, "/", strTamanio, sep="")  
destinationTifSet = paste(dirTiffsConjuntoDia, "/", strTamanio, sep="")  
dir.create(destinationTif, showWarnings = FALSE)  
dir.create(destinationTifSet, showWarnings = FALSE)  
destinationTifSet)
```

```
}
```

```
# ACUMULAR LOS ARCHIVOS RASTER JUNTO CON LOS TIFS MULTI  
CAPA.
```

```
columnOfId = "dayGroup"  
destinationTif=paste(dirTiffsDia, "/", strTamanio, sep="")  
destinationTifSet=paste(dirTiffsConjuntoDia, "/", strTamanio, sep="")  
generateAcumAndSetTifs <- function(dfDataFiles, columnOfId, destinationTif,  
destinationTifSet) {  
ids = unique(dfDataFiles[, columnOfId])  
print(paste("ids",ids, "colid:", columnOfId, "destinationTif:", destinationTif,  
"rows:",nrow(dfDataFiles)))  
print(head(dfDataFiles))  
for (currId in ids)  
pos <- which(dfDataFiles[,columnOfId] == currId
```

```
accum <- NULL  
datesIncluded <- NULL  
filesIncluded <- NULL  
for (i in pos) { #recorrer todas las posiciones  
currRow = dfDataFiles[i,]  
image <- raster(paste(currRow$file))
```

```
#TRANSFORMAR DBZ A Z / Z= 10^(DBZ/10) -> DONDE DBZ ES EL  
VALOR/UNIDAD ORIGINAL DE LA IMAGEN DE RADAR.
```

```
image <- 10^(image/10)
### Apply Z-R relation using a and b parameters
image <- (image/a)^(1/b)
image <- image/12
if (is.null(datesIncluded)) {
  accum <- image
  datesIncluded <- (date=currRow$date)
  filesIncluded <- as.character(currRow$file)
} else {
  accum <- addLayer(accum,image)
  datesIncluded <- c(datesIncluded, (date=currRow$date))
  filesIncluded <- c(filesIncluded, as.character(currRow$file))
}
}
R <- brick(accum) #multi capa

# REALIZAR LA SUMA DE ACUERDO A TODOS LOS RASTER OBTENIDOS.

if (length(datesIncluded) > 1) {
  image_raster <- calc(R, na.rm=TRUE, fun=sum )
  if (columnOfId != "hourGroup") {
    image_raster <- image_raster
  }
  } else {
    image_raster <- R
  }

# GENERAR UN NOMBRE DE ARCHIVO DE ACUERDO A LOS DATOS QUE
SE INCLUYEN EN EL MISMO.

fileName = ""
firstDateIncluded = datesIncluded[1]
minutes = as.numeric(format(firstDateIncluded,"%M"))
hours = as.numeric(format(firstDateIncluded,"%H"))
if (columnOfId == "hourGroup") {
  if (minutes == 0) {
    firstDateIncluded = firstDateIncluded - 1*60*60
  }

  fileName = format(firstDateIncluded,"%d-%m-%Y_hour%H")
  } else {

  if (hours == 0 && minutes == 0) {
    firstDateIncluded = firstDateIncluded - 24*60*60
  }
  fileName = format(firstDateIncluded,"%d-%m-%Y")
}
```


#GUARDAR LA IMAGEN ACUMULADA, EL BRICK MULTI LAYER Y UN CSV CON LAS FECHAS QUE DE INCLUYERON PARA REALIZAR LOS CÁLCULOS DE ACUMULACIÓN

```
writeRaster(image_raster, filename=paste(destinationTif,"/",
fileName,"_sum",".tif", sep=""), format="GTiff", overwrite=TRUE
writeRaster(R, filename=paste(destinationTifSet,"/", fileName,".tif", sep=""),
format="GTiff", overwrite=TRUE)
write.table(datesIncluded, file = paste(destinationTifSet,"/", fileName,".csv",
sep=""), sep = ",")
}
```

#GENERA IDS PARA CADA FILA DE ACUERDO AL GRUPO DE ACUMULACIÓN QUE PERTENEZCA, TENIENDO EN CUENTA LA HORA O EL DÍA.

```
columnOfDate solo puede valer "hourGroup" o "dayGroup"
generateDateGroupIds <- function(dfDataFiles, columnOfDate) {
dfDataFiles$hourGroup <- -1
dfDataFiles$dayGroup <- -1
```

```
startDate = dfDataFiles[1,columnOfDate]
print(paste("sd:",startDate))
minutes = as.numeric(format(startDate, "%M"))
deltaMinutes = 15
if (minutes < deltaMinutes) {
startDate = startDate - 1*60*60 - minutes*60 + deltaMinutes*60
} else if (minutes > deltaMinutes) {
startDate = startDate - minutes*60 + deltaMinutes*60
}
```

#TENIENDO LA HORA INICIAL CORREGIDA, SE CONTINUA CON LA FECHA, PARA ELLO SE TOMA EN CUENTA LA HORA Y FECHA, DEBE SEGUIR EL FORMATO YYYY/MM/DD 00:05 - YYYY/MM/DD (+1 DIA) 00:00.

```
startDateForDay = startDate
hours = as.numeric(format(startDate, "%H"))
if (hours > 0)
startDateForDay = startDateForDay - hours*60*60
}
endDate = startDate + 1*60*60 - deltaMinutes*60
endDateForDay = startDateForDay + 24*60*60 - deltaMinutes*60
```

#SE EMPIEZA A RECORRER CADA ELEMENTO DEL DATA FRAME PARA OBTENER LOS QUE ESTACIÓN DENTRO DEL RANGO DE HORAS O FECHAS.

```
idHourGroup = 1
idDayGroup = 1
```

```
for (i in 1:nrow(dfDataFiles)) {  
  currDate = dfDataFiles[i,columnOfDate]  
  repeat {  
    if (currDate >= startDate && currDate <= endDate) {  
      print(paste(startDate, "-", endDate,"id:", idHourGroup))  
      dfDataFiles[i,"hourGroup"] = idHourGroup  
      break  
    } else { startDate = startDate + 1*60*60  
              endDate = endDate + 1*60*60  
              idHourGroup = idHourGroup + 1  
            }  
  }  
}  
  
repeat {  
  if (currDate >= startDateForDay && currDate <= endDateForDay) {  
    dfDataFiles[i,"dayGroup"] = idDayGroup  
    break  
  } else {  
    startDateForDay = startDateForDay + 24*60*60  
    endDateForDay = endDateForDay + 24*60*60  
    idDayGroup = idDayGroup + 1  
  }  
}  
}  
dfDataFiles  
}
```

#####

OBTENER LAS COORDENADAS DE LOS PIXELS EN LAS IMÁGENES DE
RADAR CAXX Y EXTRAER

```
# PARTE 2 MERGED  
#Leer datos hidrica  
setwd(dirShp)
```

#LEER COORDENADAS IDRHICA

```
df_coord_idrhica <-  
read.table("C:/r_resultados_nuevoslocales/datos_pluvios/coordena_pluvioidhric  
a.csv", na.strings = "", sep = ",", header=TRUE)  
coordinates(df_coord_idrhica)<- c("x", "y")  
#proj4string(df_coord) <- CRS("+init=epsg:4326")  
proj4string(df_coord_idrhica) <- CRS("+init=epsg:32717")  
#spTransform(df_coord,CRS("+init=epsg:32717"))  
writeOGR(df_coord_idrhica, dsn = ".", layer = "df_coord_idrhica", driver = "ESRI  
Shapefile",overwrite_layer = TRUE)
```

```
#LEER COORDENADAS ETAPA
```

```
df_coord_etapa <-  
read.table("C:/r_resultados_nuevoslocales/datos_pluvios/coordena_pluvioetapa  
.csv", na.strings = "", sep = ",", header=TRUE)  
coordinates(df_coord_etapa) <- c("x", "y")  
proj4string(df_coord_etapa) <- CRS("+init=epsg:32717")  
writeOGR(df_coord_etapa, dsn = ".", layer = "df_coord_etapa", driver = "ESRI  
Shapefile", overwrite_layer = TRUE)
```

```
# AGREGAR DATOS DE PRECIPITACIONES CADA 15 MINUTOS
```

```
#para dibujar los puntos de las estaciones dentro del raster  
pointsIdrhica = readShapePoints("df_coord_idrhica.shp")  
dirTif = paste(dirTiffsHora, "/20Km", sep = "")  
fdata=list.files(path = dirTif, pattern="*.tif", full.names = TRUE)  
r <- raster(fdata[1])  
plot(r)  
points(coordinates(pointsIdrhica)[,2], coordinates(pointsIdrhica)[,1])
```

```
#GENERAR UN DATAFRAME CON LA RUTA DE DE LOS ARCHIVOS TIFF  
QUE ESTAN EN EL DIRECTORIO INDICADO CON SU RESPECTIVA FECHA  
A LA CUAL CORRESPONDE.
```

```
getDfProcessedTifs <- function (dir, areDailyTifs = FALSE) {  
  files = list.files(path = dir, pattern='.tif', full.names = TRUE) fileDateList <-  
  NULL  
  for (j in 1:length(files)) {  
    fileName = basename(files[j])  
    strOnlyDate = substr(fileName, 1, 10)
```

```
    if (areDailyTifs == FALSE) {  
      strHour = substr(fileName, 16,17) #extraer solo la hora del nombre del  
      archivo  
      fecha = as.POSIXct(strptime(paste(strOnlyDate, strHour), "%d-%m-%Y  
      %H"), tz = "America/Guayaquil") #convertir el texto fecha a fecha  
    } else {  
      fecha = as.POSIXct(strptime(strOnlyDate, "%d-%m-%Y"), tz =  
      "America/Guayaquil") #convertir el texto fecha a fecha  
    }  
  }
```

```
  #agregar la fecha a una lista  
  if (is.null(fileDateList)) {  
    fileDateList = fecha  
  } else {  
    fileDateList = c(fileDateList, fecha)  
  }  
}
```

```
#GENERAR UN DATA FRAME CON LAS RUTAS DE TODOS LOS  
ARCHIVOS Y SUS FECHAS CORRESPONDIENTES.
```

```
dfDataFiles = data.frame(file=files, date = fileDateList, stringsAsFactors = FALSE)
dfDataFiles = dfDataFiles[order(dfDataFiles$date),] #sort by date, ascending
dfDataFiles
}
```

#LLENAR EL DATAFRAME CON LOS PUNTOS QUE CORRESPONDEN.

```
fillDfWithPointsImg <- function(shpPoints, dfDataFiles, mapping) {
  stations = paste(shpPoints$nombre)
  dfDataFiles[,stations] <- -1 #inicializar las columnas con -1
  stackSize = 10

  if (stackSize == -1) { stackSize = nrow(dfDataFiles) }
  for (i in seq(1, nrow(dfDataFiles), stackSize)) {
    endPos = i+stackSize-1
    if (endPos > nrow(dfDataFiles)) { #si endPos sobrepasa el total de filas del
      data frame
      pos = i:nrow(dfDataFiles)
    } else {
      pos = i:endPos
    }
    s = stack(dfDataFiles$file[pos])
    coor = cbind(coordinates(shpPoints)[,1], coordinates(shpPoints)[,2])
    imgData <- t(extract(s, coor))
    dfDataFiles[pos, stations] <- imgData #guardar el resultado en el data frame
  }
}
```

#ELIMINACIÓN DE FILAS O COLUMNAS CON NA.

```
oldNumCols = ncol(dfDataFiles)-2
oldNumRows = nrow(dfDataFiles)
dfDataFiles = Filter(function(x)!all(is.na(x)), dfDataFiles)
dfDataFiles = Filter(function(x)!all(x==0), dfDataFiles)
dfDataFiles = dfDataFiles[complete.cases(dfDataFiles),]
dfDataFiles = plyr::rename(dfDataFiles, mapping, warn_missing = FALSE)
currNumCols = ncol(dfDataFiles) -2
currNumRows = nrow(dfDataFiles)

guardar las estadísticas en un data frame
statsDf = data.frame(tipo=c("antes","despues","porcentaje"),
  ncols=c(oldNumCols, currNumCols, round(currNumCols / oldNumCols *
    100,1)),
  nrows=c(oldNumRows, currNumRows, round(currNumRows / oldNumRows *
    100,1)))
resultList = list(dataframe = dfDataFiles, stats = statsDf)
resultList
}
```



```
rr=raster("/home/rstudio/tesis_primera/Ejemplo_tesis_pregrado/100Km/2015-04-16/2015041623500000dBZ.ppi_top.tif")
plot(rr)
points(coordinates(pointsIdrhica)[,2], coordinates(pointsIdrhica)[,1])
points(coordinates(pointsEtapa)[,2], coordinates(pointsEtapa)[,1])
```

```
#COMENZAR A CORRER EL SCRIPT
```

```
#GENERAR LOS DATA FRAME COMPUESTOS POR LOS VALORES DE
LAS IMAGENES DE RADAR EN CIERTOS PUNTOS (ESTACIONES)
GEOREFERENCIADOS.
```

```
start_task <- Sys.time ()
setwd(dirShp)
n.cores=detectCores()
cl<-makeCluster(n.cores)
registerDoParallel(cl)
cluster<-makeCluster(n.cores) #<- # of processors / hyperthreads on machine
registerDoParallel(cluster)
registerDoSNOW(cluster)
```

```
n.cores=detectCores()
registerDoMC(cores=n.cores)
cluster<-makeCluster(n.cores) #<- # of processors / hyperthreads on machine
registerDoSNOW(cluster)
library(maptools)
```

```
#LEER LOS PUNTOS DE IDHRICA Y ETAPA.
```

```
pointsIdrhica = readShapePoints("df_coord_idrhica.shp", proj4string =
CRS("+init=epsg:32717")) #leer los puntos del shapefile de idrhica
pointsEtapa = readShapePoints("df_coord_etapa.shp", proj4string =
CRS("+init=epsg:32717")) #leer los puntos del shapefile de idrhica
```

```
dirTiffs = c(c(),
             paste(dirTiffsHora,"/",basename(dirsDatosRadar), sep=""),
             #paste(dirTiffsDia,"/",basename(dirsDatosRadar), sep="") ,
             c())#obtener los directorios a procesar, tanto horarios como diarios
proc = foreach (dir = dirTiffs) %dopar% {
  #for (dir in dirTiffs) {
```

```
library(raster)
library(stringr)
library(gdata)
```

```
isDaily = startsWith(normalizePath(dir), normalizePath(dirTiffsDia))
dfDataFiles = getDfProcessedTifs(dir, areDailyTifs = isDaily)
```

#LEER LAS IMAGENES EN PUNTOS ESPECIFICOS Y GUARDARLOS EN EL DATA FRAME.

```
resultList.etapa = fillDfWithPointsImg(pointsEtapa, dfDataFiles, c())  
dfDataFiles.etapa = resultList.etapa$dataframe  
dfDataFiles.etapa.stats = resultList.etapa$stats
```

```
resultList.idrhica = fillDfWithPointsImg(pointsIdrhica, dfDataFiles, c())  
dfDataFiles.idrhica = resultList.idrhica$dataframe  
dfDataFiles.idrhica.stats = resultList.idrhica$stats  
fileName = basename(dir)
```

#GUARDAR LOS DATA FRAME EN CSV.

```
write.table(dfDataFiles.idrhica, file = paste(dir, "../dfPointsData_idrhica_",  
fileName, ".csv", sep=""), sep = ",", row.names = FALSE)  
write.table(dfDataFiles.idrhica.stats, file = paste(dir, "../statsImgPoints_idrhica_",  
fileName, ".csv", sep=""), sep = ",", row.names = FALSE)
```

```
write.table(dfDataFiles.etapa, file = paste(dir, "../dfPointsData_etapa_",  
fileName, ".csv", sep=""), sep = ",", row.names = FALSE)  
write.table(dfDataFiles.etapa.stats, file = paste(dir, "../statsImgPoints_etapa_",  
fileName, ".csv", sep=""), sep = ",", row.names = FALSE)
```

```
0  
}  
Filter(function(x)!all(is.na(x)), df)  
stopCluster(cluster)  
end_task <- Sys.time () - start_task  
end_task
```

#REALIZAR LA UNIÓN DE LOS DATOS DE LOS PUNTOS DE LA IMAGEN DE RADAR, CON LOS DATOS DE LOS PLUVIOS.

```
#Leer datos idrhica  
#df_est_idrhica <-  
read.table("C:/r_resultados_nuevoslocales/datos_pluvios/pluvios_idrhica_.csv",  
na.strings = "", sep = ",", header=TRUE, stringsAsFactors = FALSE)  
#df_est_idrhica.diario$Fecha2 <- as.POSIXct(strptime(df_est_idrhica.$FECHA,  
"%d/%m/%Y %H:%M")) #
```

```
df_est_idrhica<- read.table("C:/Users/Usuario1/Desktop/respaldo/respaldo HP  
/Desktop/universidad/tesis_excel/tesis.luis/acumulacion/idrhica_360min.csv",  
na.strings = "", sep = ",", header=TRUE, stringsAsFactors = FALSE)  
df_est_idrhica.horario$Fecha2 <-  
as.POSIXct(strptime(df_est_idrhica.horario$Fecha, "%d/%m/%Y %H:%M")) #
```

```
#Leer datos etapa  
#df_est_etapa<read.table("C:/r_resultados_nuevoslocales/datos_pluvios/pluvio  
s_etapa.csv", na.strings = "", sep = ",", header=TRUE, stringsAsFactors =  
FALSE)
```



```
#df_est_etapa$Fecha2 <- as.POSIXct(strptime(df_est_etapa$FECHA,
"%d/%m/%Y %H:%M"))

df_est_etapa<- read.table("C:/Users/Usuario1/Desktop/respaldo/respaldo
HP/Desktop/universidad/tesis_excel/tesisluís/acumulacion/etapa_360min.csv",
na.strings = "", sep = ",", header=TRUE, stringsAsFactors = FALSE)
df_est_etapa.horario$Fecha2 <-
as.POSIXct(strptime(df_est_etapa.horario$Fecha, "%d/%m/%Y %H:%M"))

#DIRECTORIOS DONDE ESTÁN LOS DATAFRAME DE LOS VALORES DE
LAS IMÁGENES EN PUNTOS DE LAS ESTACIONES VS FECHA/HORA

dirDfPoints = c(c(),
                dirTiffsHora,
                #dirTiffsDia,
                c())
for (dirDf in dirDfPoints) {
#obtener todos los archivos que empiecen con un texto y terminen en csv
files = list.files(path = dirDf, pattern='dfPointsData_*.csv$', full.names = TRUE)

for (file_df in files) {
#leer el csv
dfPoints <- read.table(file_df, na.strings = "", sep = ",", header=TRUE,
stringsAsFactors = FALSE)
fileName <- basename(file_df)

EXTRAER LOS DATOS DEL NOMBRE DEL ARCHIVO (PARA SABER SI ES
IDHRICA O ETAPA Y SI ES IMAGEN DE 100KM O MENOS)

regex = str_match(fileName,".*(idrhica|etapa)_([0-9]+[Kk]m).*.csv")
institution = regex[2]
strDistance = regex[3]

#UNIR LAS COLUMNAS DE LOS PLUVIOMETROS CON VALORES DEL
RADAR
commonCols <- Reduce(intersect, list(names(dataFramePluvios),
names(dfPoints)))
dfMerge = merge(dataFramePluvios[,commonCols], dfPoints[,commonCols], by
= "Fecha2")
commonCols = commonCols[-which(commonCols == "Fecha2")]
fileNameErrMerge = paste("errorMerge_", ifelse (isIdrhica, "idrhica","etapa"),
"_", strDistance, sep = "")
if (length(commonCols) == 0) {
contenido = c
paste("Nombres de pluvios en imagen:",
paste(names(dfPoints)[!names(dfPoints) %in% c("Fecha2")], collapse = " "),
paste("Nombres de pluvios en datos lluvia:",
paste(names(dataFramePluvios)[!names(dataFramePluvios) %in% c("Fecha2",
"FECHA")], collapse = " ")
)
```

```
writeLines(contenido, paste(dirDf,"/",fileNameErrMerge,".txt", sep=""))
} else {
  if (file.exists(paste(dirDf,"/",fileNameErrMerge,".txt", sep=""))) {
    file.remove(paste(dirDf,"/",fileNameErrMerge,".txt", sep=""))
  }
columnasPluvios = paste(commonCols, "x", sep = ".") #las columnas que
pertenece a los pluviómetros terminan en ".x"

colsWithFirstData = names(Filter(function(x)!all(is.na(x)),
dfMerge[,columnasPluvios]))
colsWithData = substr(colsWithFirstData,1,nchar(colsWithFirstData)-2)

colsSecondData = paste(colsWithData, "y", sep = ".")

#del merge, seleccionar solo las columnas que resultantes
dfMerge = dfMerge[, c("Fecha2", colsWithFirstData, colsSecondData)]
dfMerge = dfMerge[complete.cases(dfMerge),]
```

#####

INTERPOLACIONES USANDO IDW E IDW MÁS INTEGRACIÓN DE IMÁGENES

```
library(rgdal)
library(sp)
library(gstat)
library(raster)
library(stringr)
library(rgeos)
library(rasterVis)

setwd("C:/tesis")
#Estaciones etapa - idhrica
archivoShpPluvios = "pluvios_20km_reflectividadF"
prec2<-readOGR("shp",archivoShpPluvios)
prec <- spTransform(prec2,CRS("+init=epsg:32717"))#transformacion CRS
coord <- (prec2[,c("nombre", "x", "y")])
coord <-coord[!duplicated(coord$nombre), ] # eliminar coordenadas duplicadas

#IMÁGENES

setwd("C:/tesis/datos imagenes/Hora/20km")
dirImag = "C:/tesis/datos imagenes/Hora/20km"
files <- list.files(pattern='.tif')

dirMergedData = "C:/tesis/mergehorario"
fileMergedData = paste(dirMergedData,"/mergedData2_20kmF.csv", sep = "")
archivoPluvios = fileMergedData
```



```
pluvios<-read.table(archivoPluvios, sep = ",", header = TRUE, na.strings = "",
stringsAsFactors = FALSE) # Serie temporal, variable accum_est.tsc.full
pluvios <- pluvios[complete.cases(pluvios),]
```

DETERMINAR ZONA DE ESTUDIO PARA INTERPOLACIÓN

```
rect <- gBuffer(as(extent(prec), 'SpatialPolygons'), width= 5000)
grid = spsample(rect, type = "regular", cellsize = c(100,100))
gridded(grid) <- TRUE
class(grid) <- "SpatialGrid"
crs(grid) <- "+init=epsg:32717"

nameSplits = strsplit(archivoShpPluvios, "_")[[1]]
radio = nameSplits[2]

pluviosComunes =
as.character(coord$nombre)[paste(as.character(coord$nombre),"x",sep=".")
%in% names(pluvios)]
columnasDatosPluvios = paste(pluviosComunes,"x",sep=".")
columnasDatosradar = paste(pluviosComunes,"y",sep=".")
fechasSinValRepetidos = pluvios[apply(pluvios[,columnasDatosPluvios],1,
function(x) length(unique(x))>1),c("Fecha2", columnasDatosPluvios)]
```

CORRELACIÓN POR TIEMPOS.

```
corr=c()
for (i in rownames(fechasSinValRepetidos)){#i=1
  corr= rbind(corr, cor(t(pluvios[i, columnasDatosPluvios]), t(pluvios[i,
columnasDatosradar])))
}
```

```
boxplot(corr)
mean(corr, na.rm=TRUE)
quantile(corr,na.rm=TRUE)
```

```
fechasSinValRepetidos2 <- s0.5[complete.cases(s0.5),]
fechasSinValRepetidos2 <- fechasSinValRepetidos
rango = 1:nrow(fechasSinValRepetidos2)
scv = c()
scvrc = c()
for(i in rango) {# i=1
  print(i)
```

#GEORREFERENCIAR DATOS A INTERPOLAR

```
df <- data.frame(t(fechasSinValRepetidos2[i,-1]),
colnames(fechasSinValRepetidos2[i,-1]))# extraer datos del mes i para
interpoliar
names(df) <- c("valor", "nombre")# nombres de columnas
df$nombre = str_sub(df$nombre, 1, -3)
```

```
df <- subset(df, !is.na(df$valor)) # eliminar datos NA
df <- merge(df, coord, by="nombre") # asignar coordenadas por código de
estacion
coordinates(df) <- c("coords.x1", "coords.x2")
proj4string(df) <- CRS("+init=epsg:32717")
```

```
#ORGANIZAR COVARIABLE.
```

```
fecha = fechasSinValRepetidos2$Fecha2[i]
fecha = as.POSIXct(strptime(fecha, "%d/%m/%Y %H:%M")) # horario
archivolmag = format(fecha, "%d-%m-%Y_%H-%M_sum.tif")
imageraster <- raster(paste(dirlmag, "/", archivolmag, sep="")) # cargar imagen
imageraster <- crop(resample(imageraster, raster(grid), method="ngb"), grid)
df$cov <- extract(imageraster, df)
grid$cov <- values(imageraster)
spplot(imageraster)
```

```
#INTERPOLACION IDW DE PLUVIOS
```

```
idwp <- krige(valor ~ 1, df, grid) # IDW
idwp$var1.pred <- ifelse(idwp$var1.pred < 0, 0, idwp$var1.pred)
spplot(idwp, "var1.pred")
```

```
#VALIDACION CRUZADA IDW PLUVIOS
```

```
cv <- data.frame(krige.cv(valor ~ 1, df))
rmse <- sqrt(sum(cv$residual^2)/length(cv$residual))
cor <- cor(cv$observed, cv$var1.pred)
scv <- rbind(scv, cbind(rmse, cor, mean(cv$residual)))
```

```
# CORRECCIÓN CON IDW, SE TOMA SOLO LA DIFERENCIA PLUVIO-
RADAR Y CON ELLA SE GENERA LA SUPERFICIE DE ERROR.
```

```
df$res <- df$valor - df$cov
idwres <- krige(res ~ 1, df, grid) # Superficie de corrección
idwres$corr <- grid$cov + idwres$var1.pred
idwres$corr <- ifelse(idwres$corr < 0, 0, idwres$corr)
#spplot(idwres, "var1.pred")
#spplot(idwres, "corr")
```

```
#6- VALIDACIÓN CRUZADA DE CORRECCIÓN POR RESIDUOS
```

```
residual <- c()
prediccion <- c()
for(j in 1:8){ #cambiar 8 u 11 por número de estaciones j=12 df@data
df2 <- df
est <- df[j,]
df2 <- df[-j,]
```

```
df2$res <- df2$valor - df2$cov
```

```
idwvc <- krige(res ~ 1, df2, est) # se hace sola la predicción en el punto de
interes
idwvc$corr <- est$cov + idwvc$var1.pred
idwvc$corr <- ifelse(idwvc$corr < 0, 0, idwvc$corr)

pred <- idwvc$corr
prediccion <- rbind(prediccion, pred)
residual <- rbind(residual, est$valor - pred)
}

df$prediccion <- prediccion
cases <- df[complete.cases(df@data),]
rmserc <- sqrt(sum(residual^2, na.rm = TRUE)/length(residual))
corrc <- cor(cases$valor, cases$prediccion)
scvrc <- rbind(scvrc, cbind(rmserc, corrc, mean(residual)))

imageraster<- addLayer(imageraster, raster(idwp))
imageraster<- addLayer(imageraster, raster(idwres))
imageraster<- addLayer(imageraster, brick(idwres)[[3]])

names(imageraster) <- c("radar", "idw pluvios", "correccion", "radar corr")

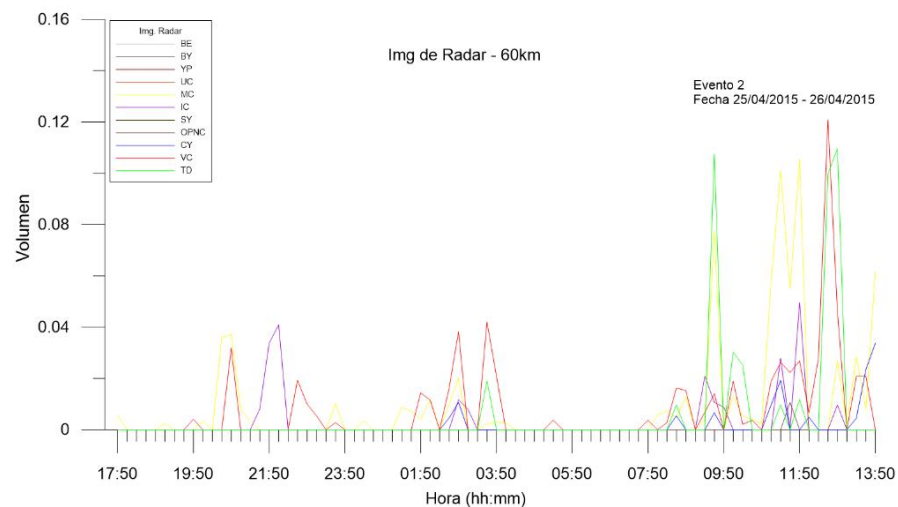
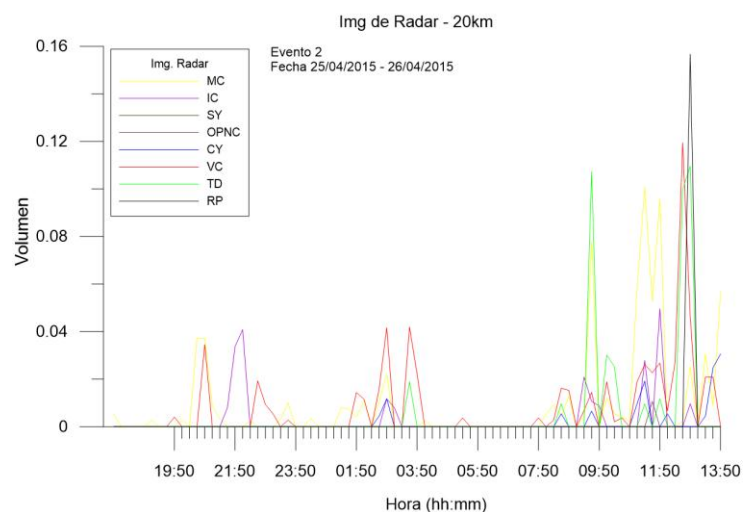
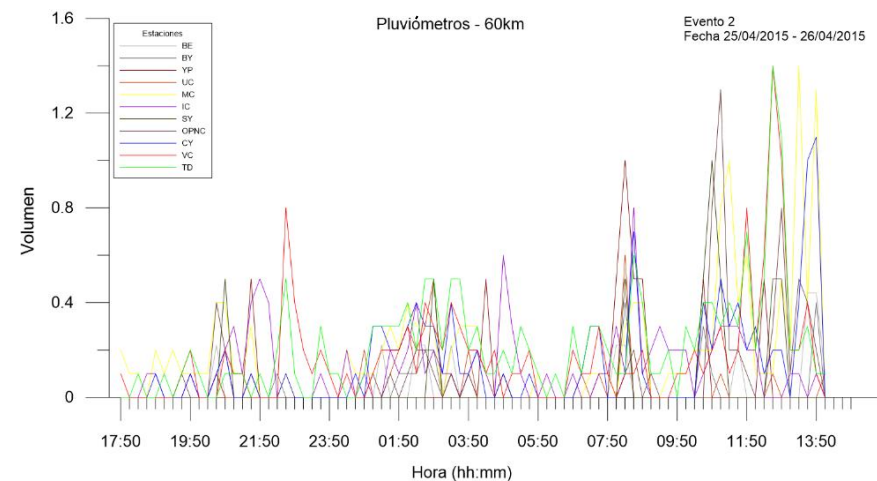
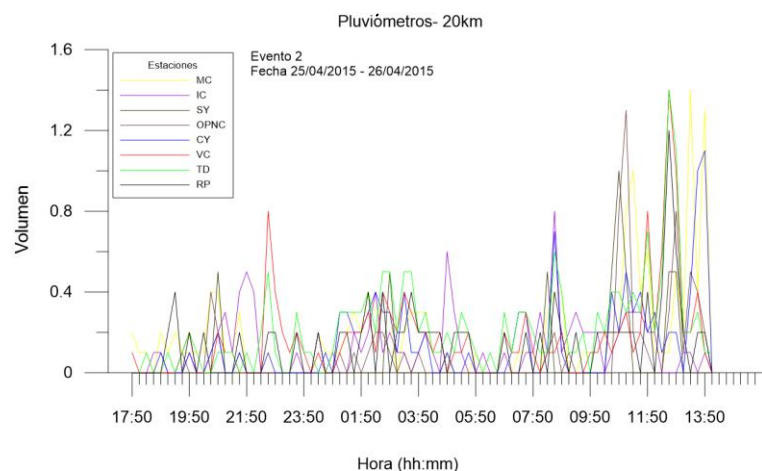
png(file=paste("C:/tesis/outputs/", i, ".png", sep=""))
print(spplot(imageraster, main= c(summary(lm(valor ~
cov,data.frame(df)))$r.squared, rmserc, corrc)))
dev.off()
}
boxplot(scv[,1], scvrc[,1])
boxplot(scv[,2], scvrc[,2])
boxplot(scv[,3], scvrc[,3])

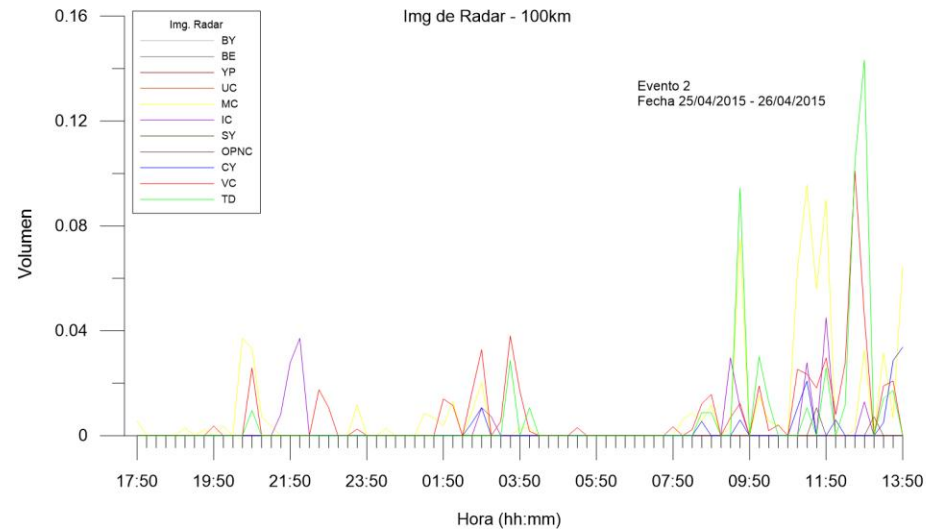
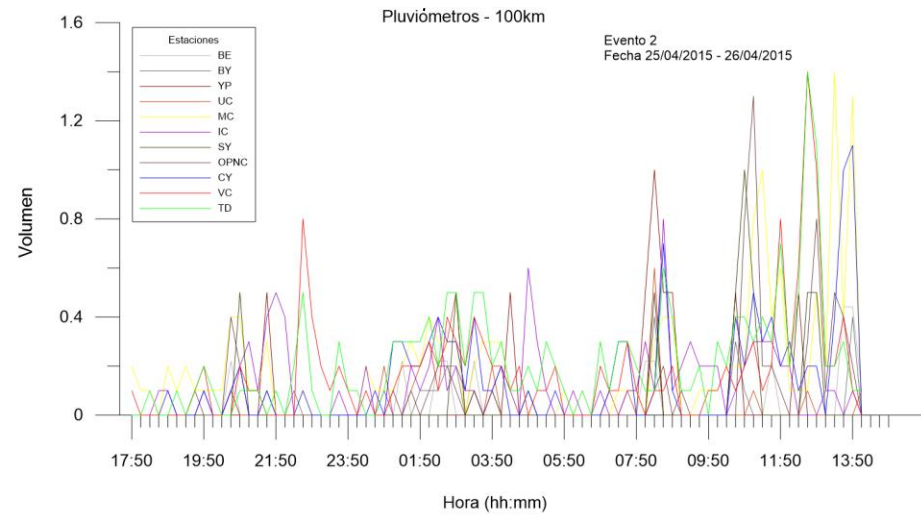
# RESULTADOS DE RMSE
mean(scv[,1])
mean(scvrc[,1], rm.na=TRUE)

# RESULTADOS DE CORRELACIÓN OBSERVACIÓN - PREDICCIÓN
mean(scv[,2])
mean(scvrc[,2], na.rm=TRUE)

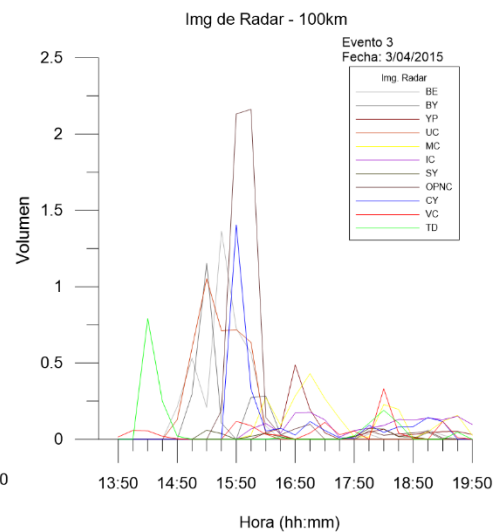
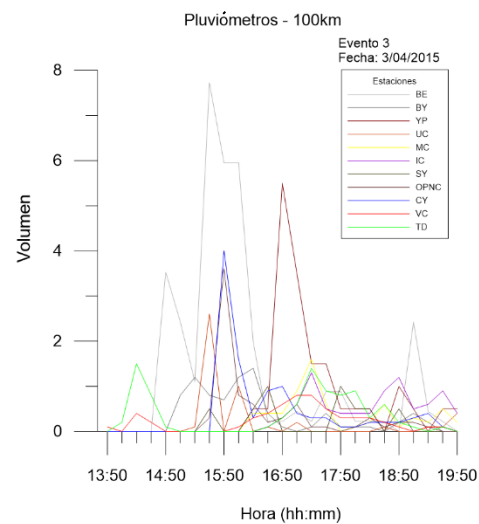
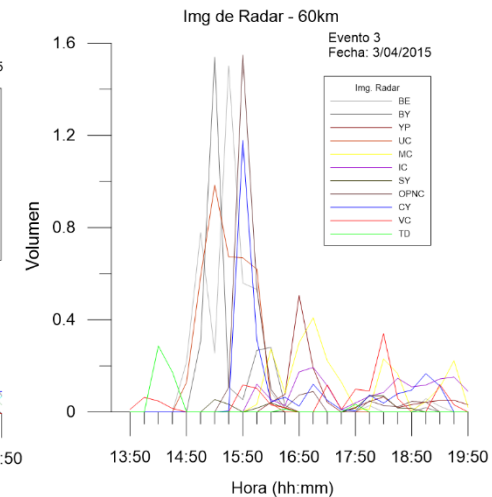
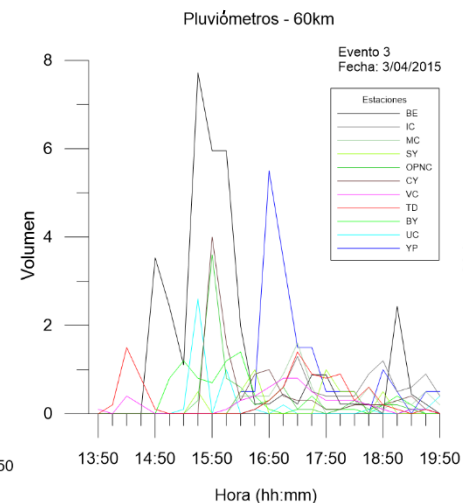
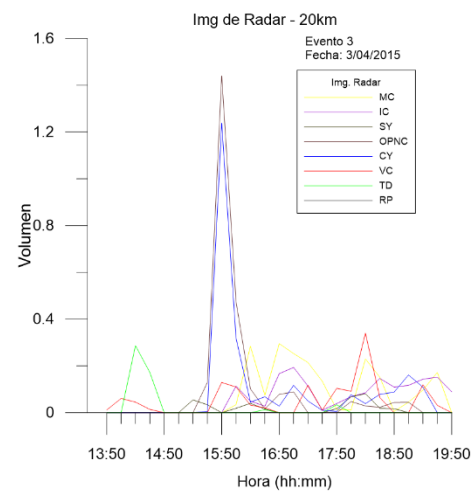
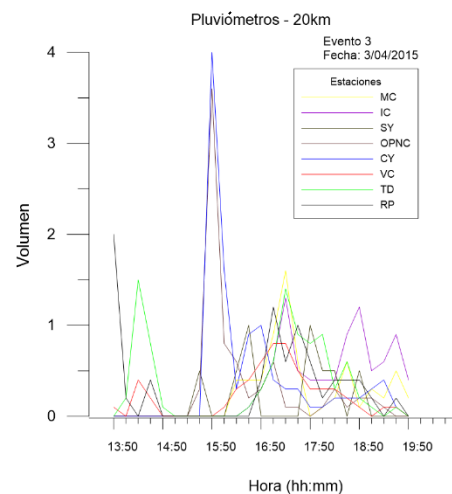
# RESULTADOS DE MEDIA DE RESIDUOS
mean(scvrc[,3], na.rm=TRUE)
plot(scv[,2], type="l", ylim=c(-1, 1))
abline(h=mean(scv[,2]))
```

Anexo B: Gráficos de distribución de precipitación en pluviómetros y radar CAXX en los diferentes alcances de reflectividad para los eventos 2 y 3

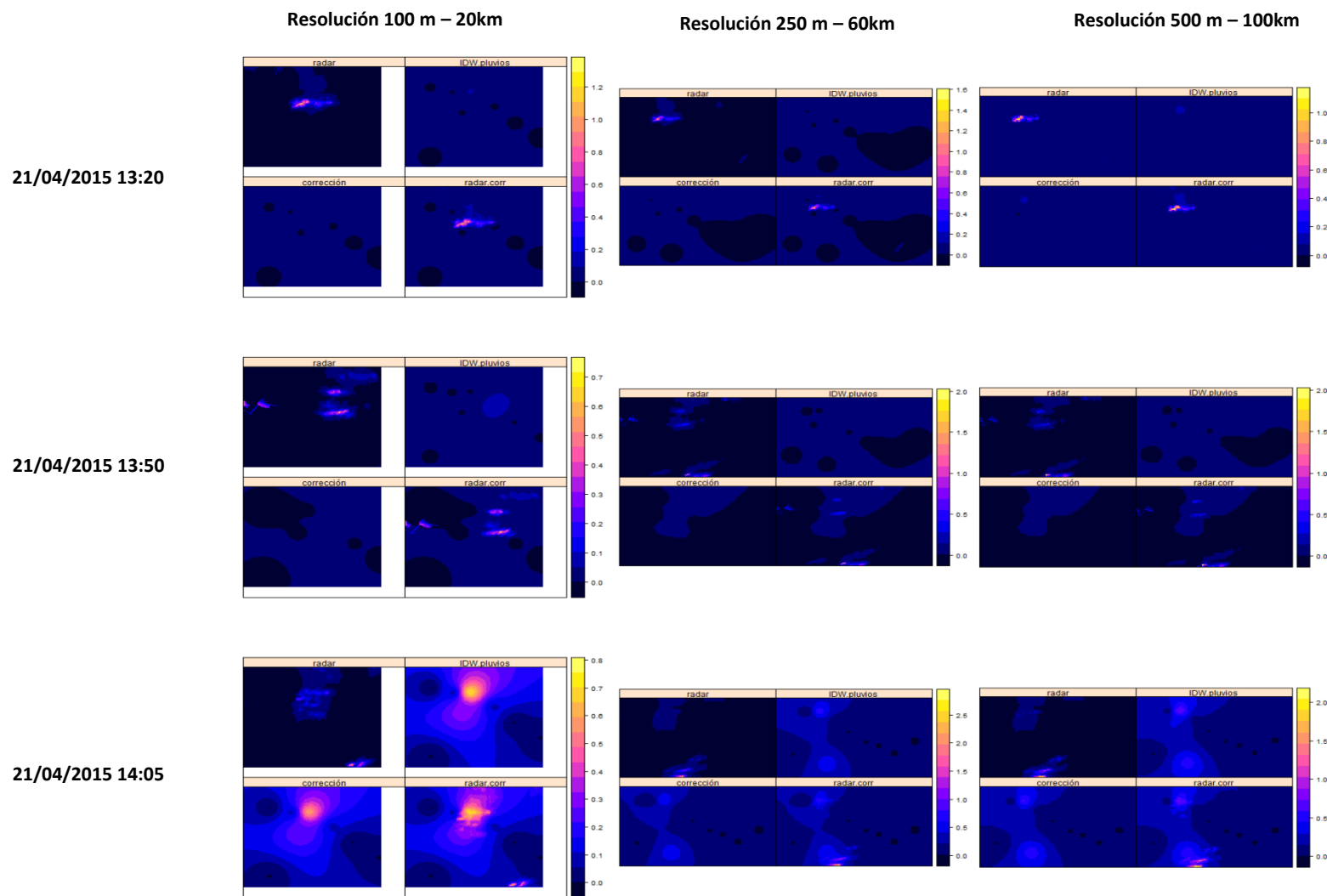


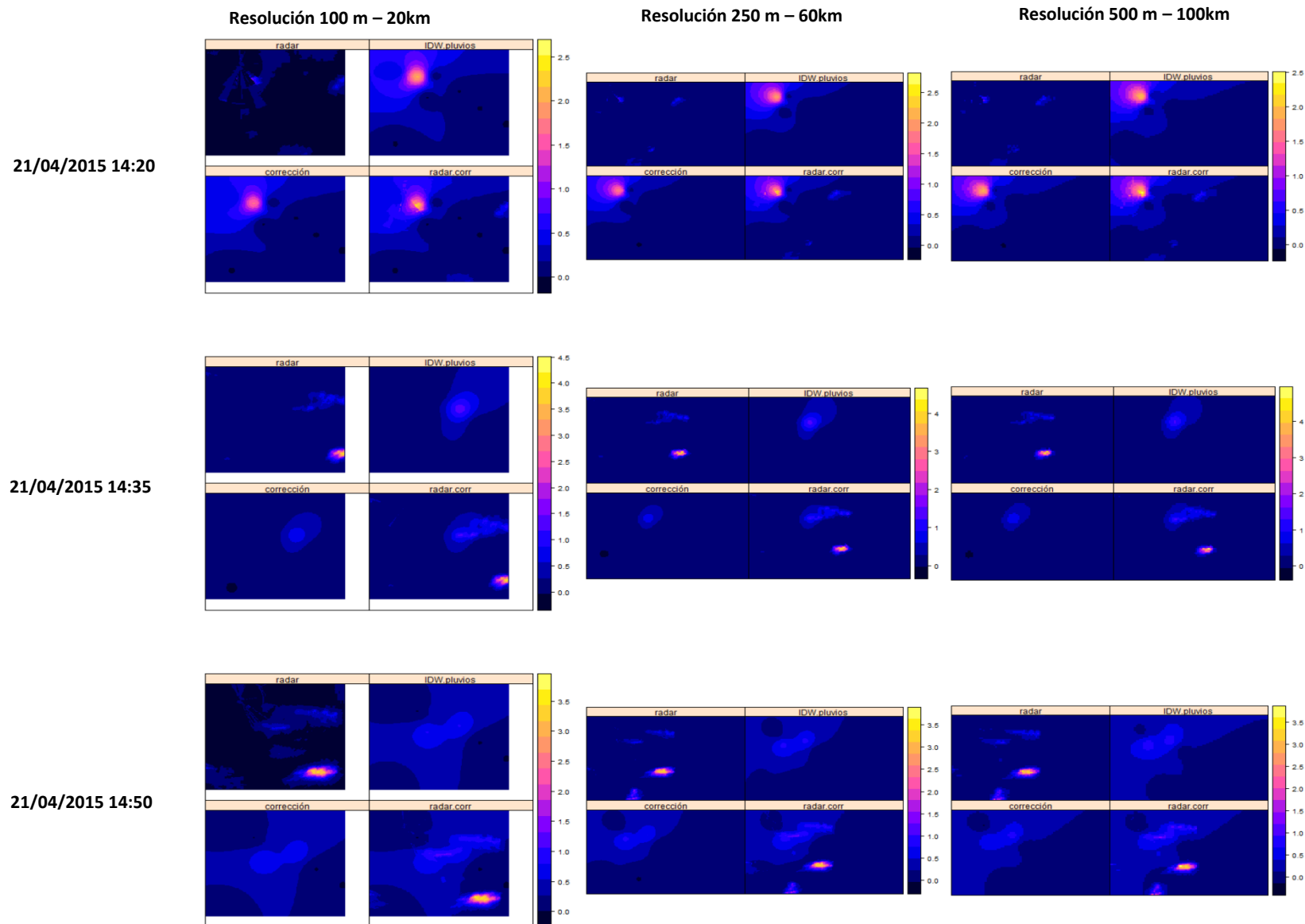


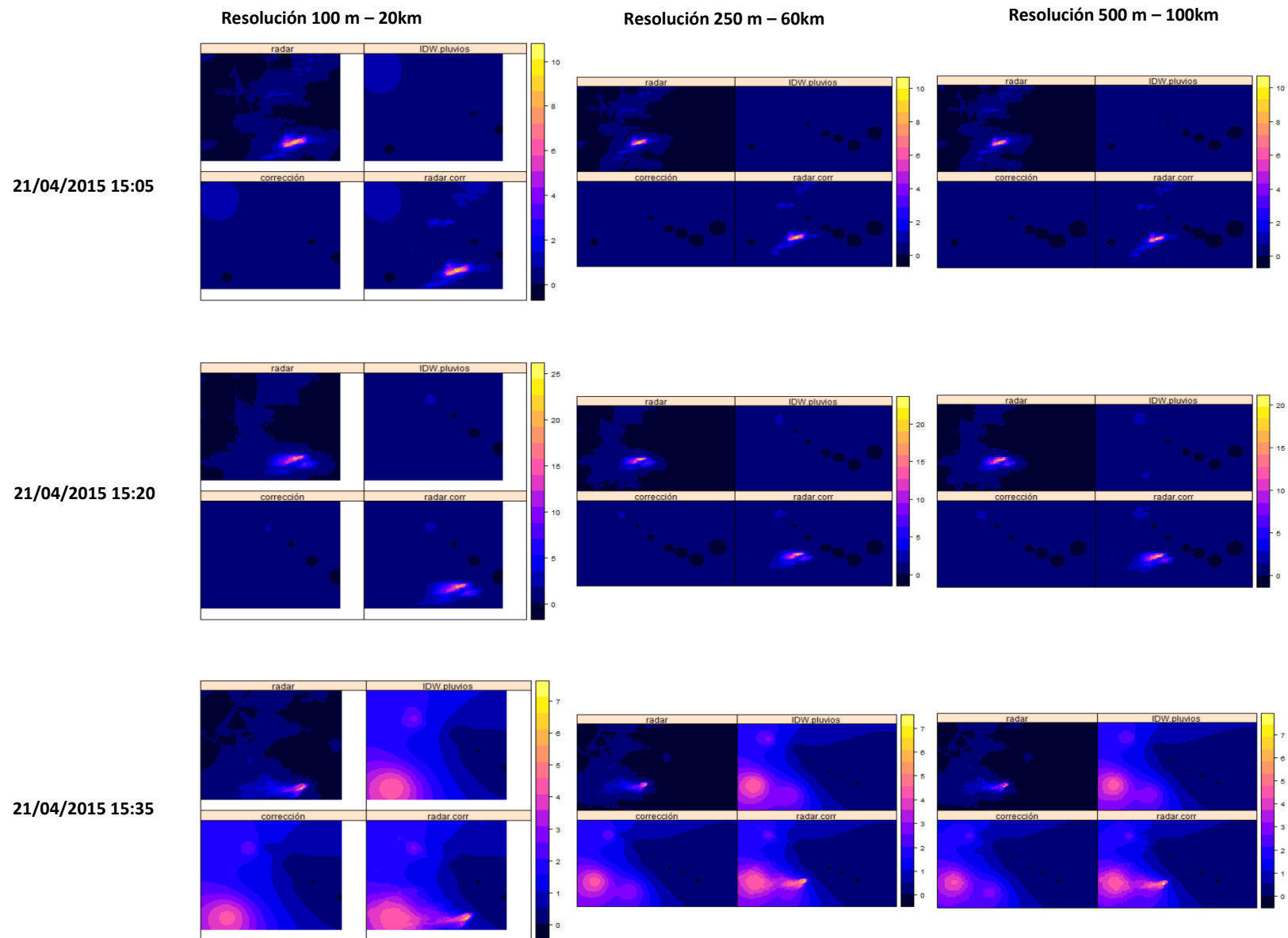
EVENTO 3

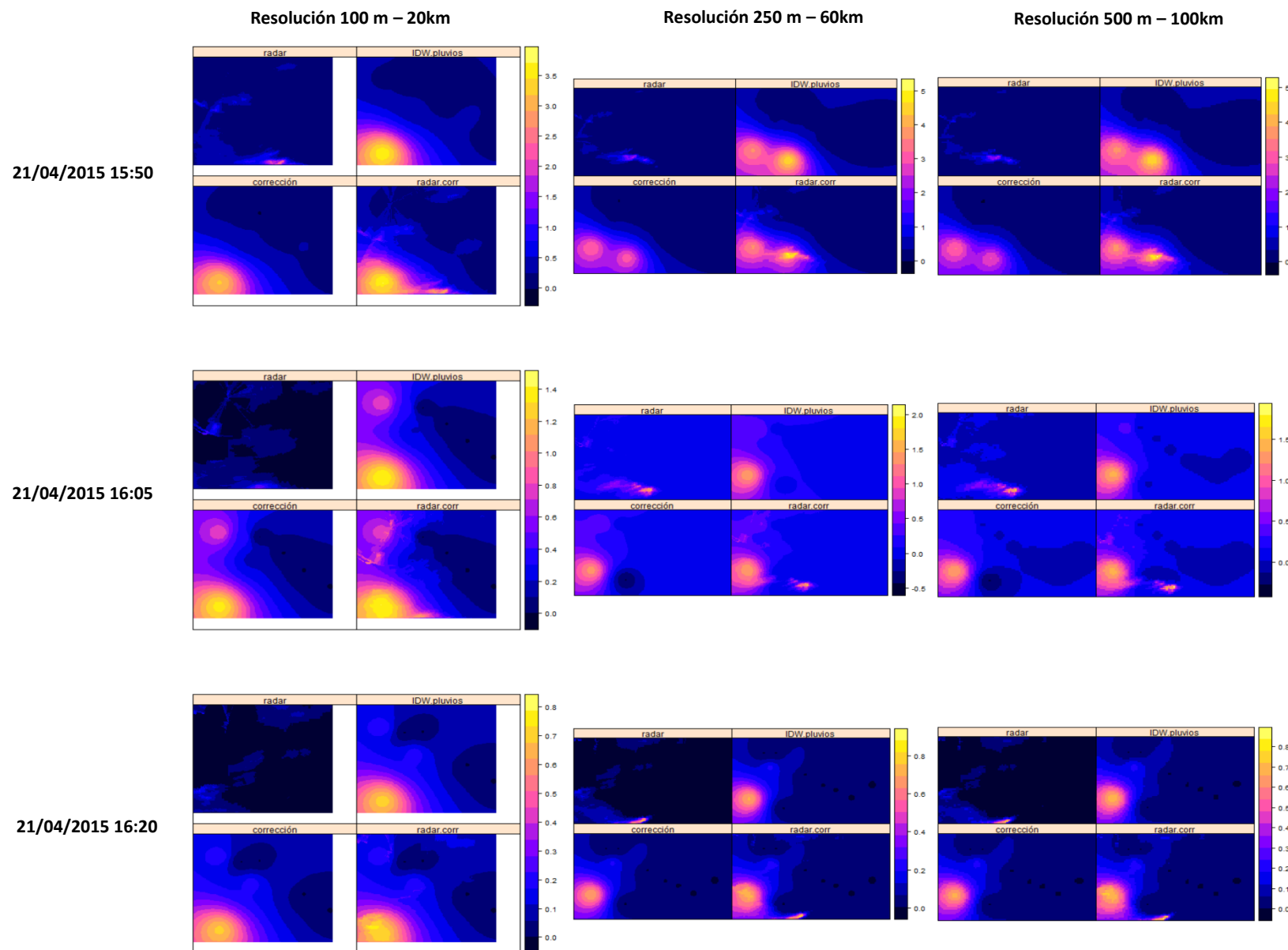


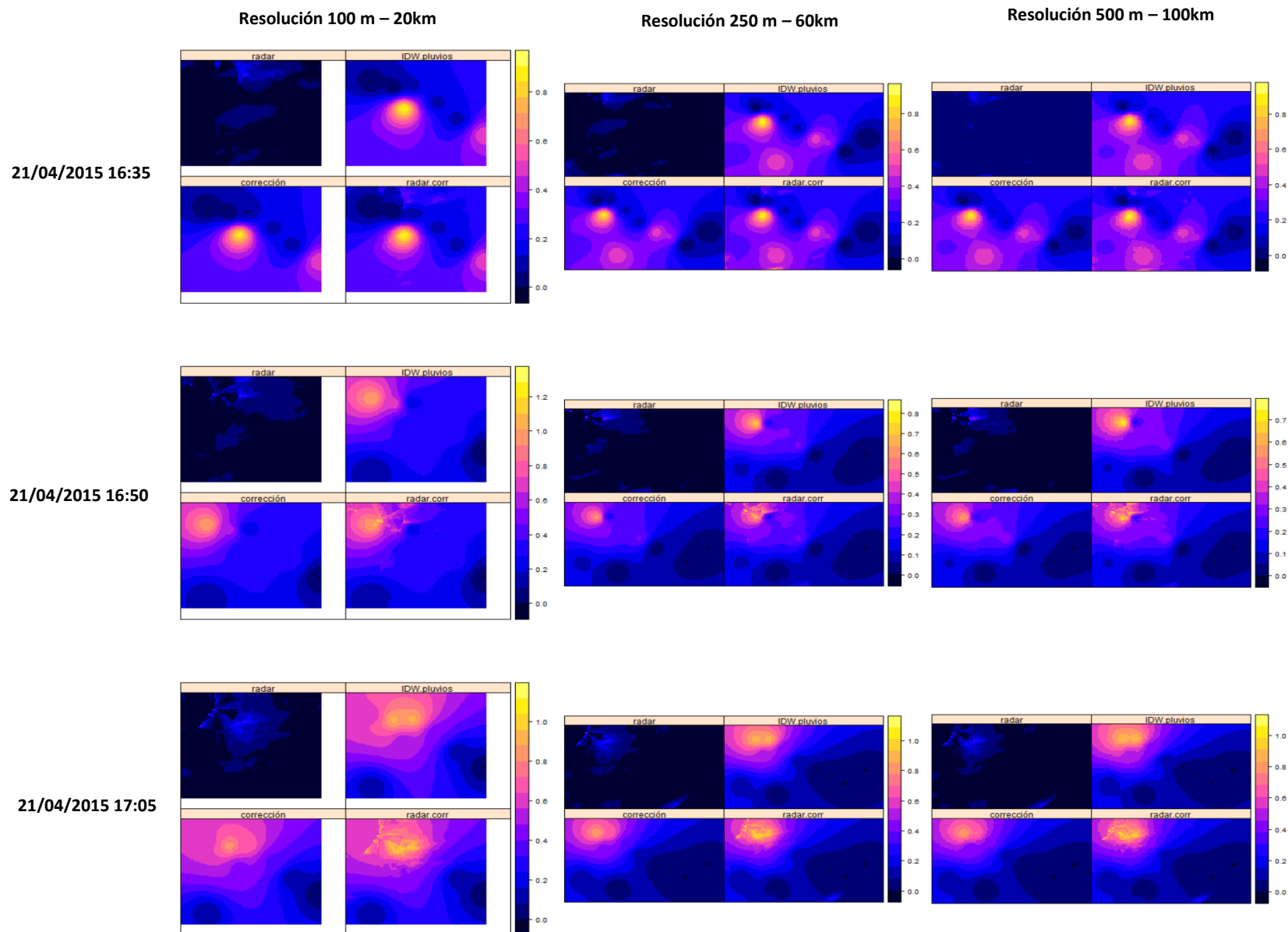
Anexo C: Imágenes de estimación de precipitación usando IDW e IDW más integración de imágenes de radar meteorológico para los eventos 1, 2,3 en los alcances de reflectividad de 20, 60 y 100km.

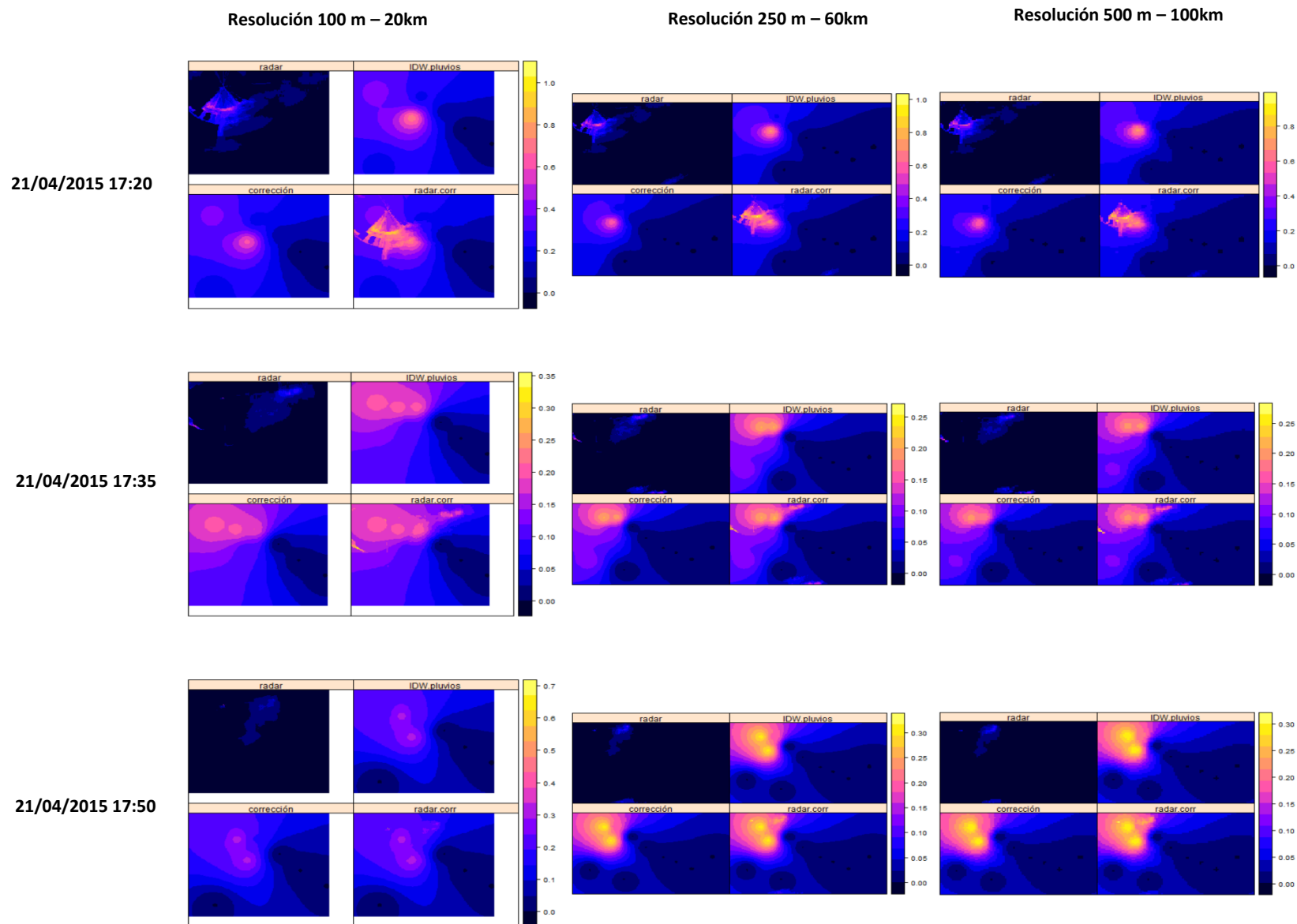


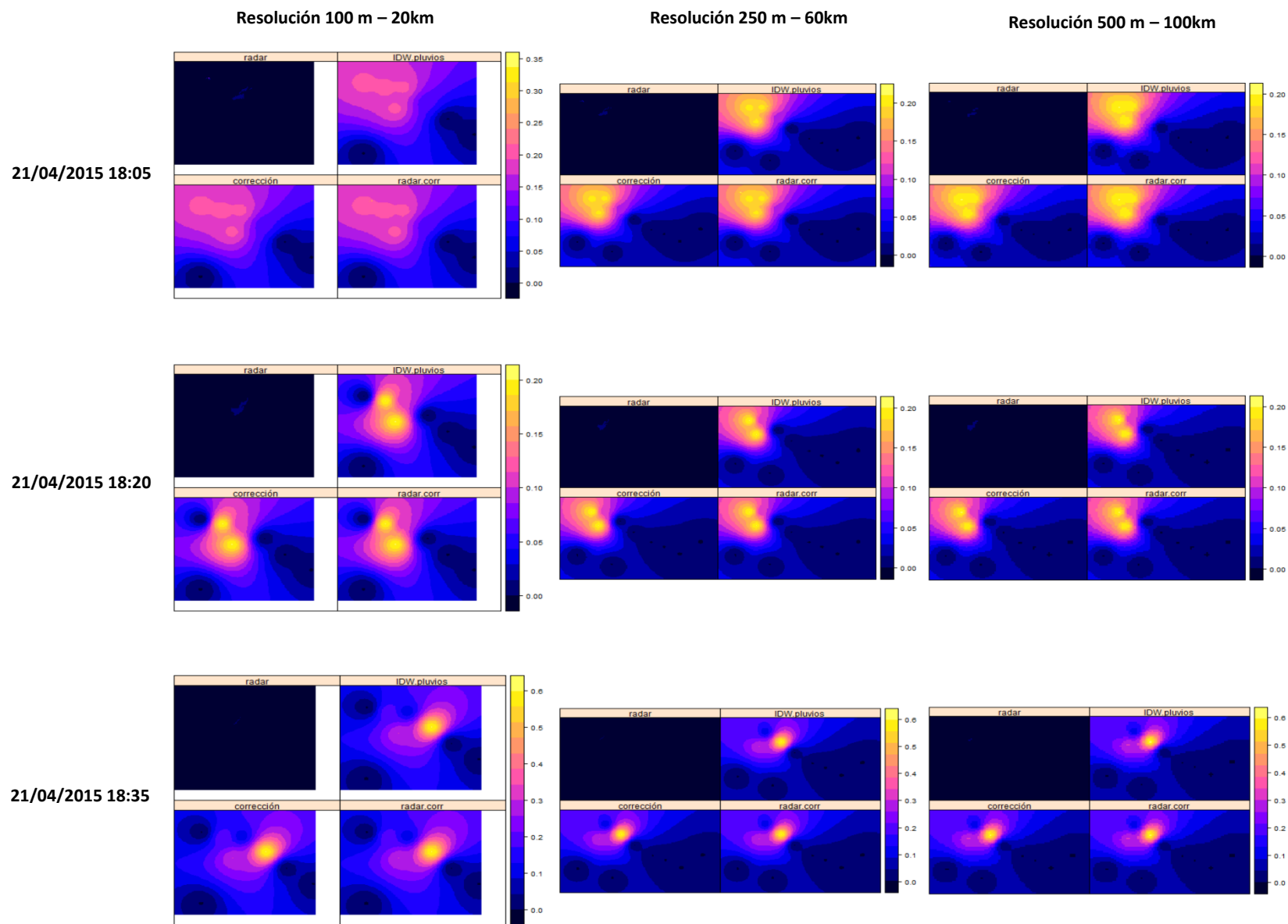












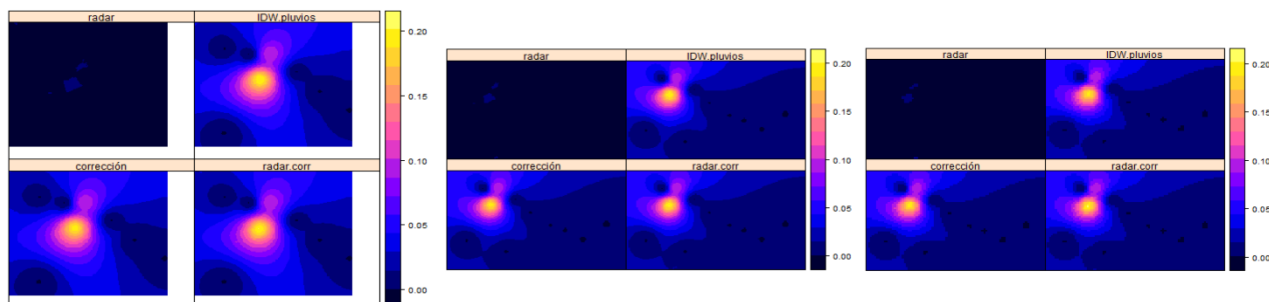
EVENTO 2

Resolución 100 m – 20km

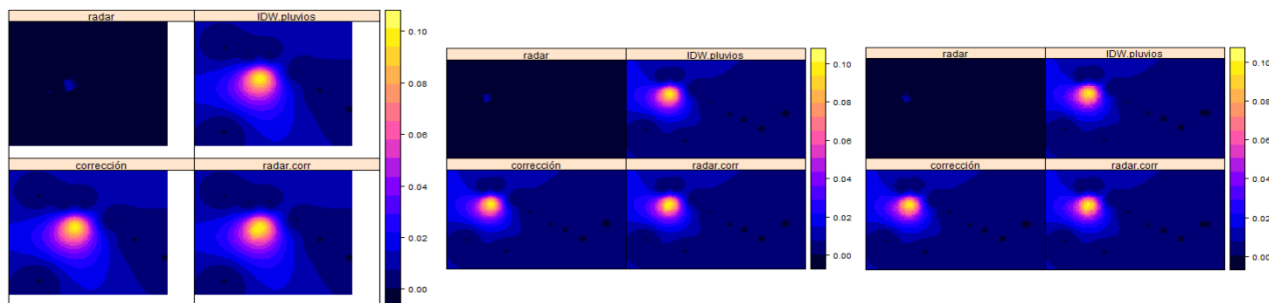
Resolución 250 m – 60km

Resolución 500 m – 100km

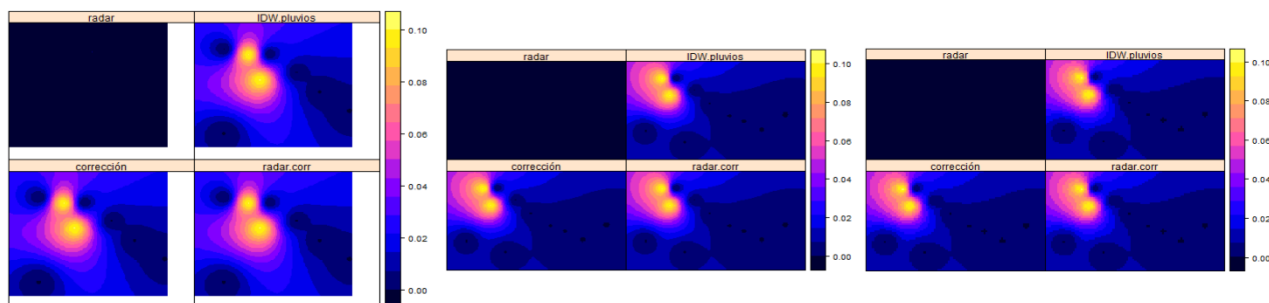
25/04/2015 18:35

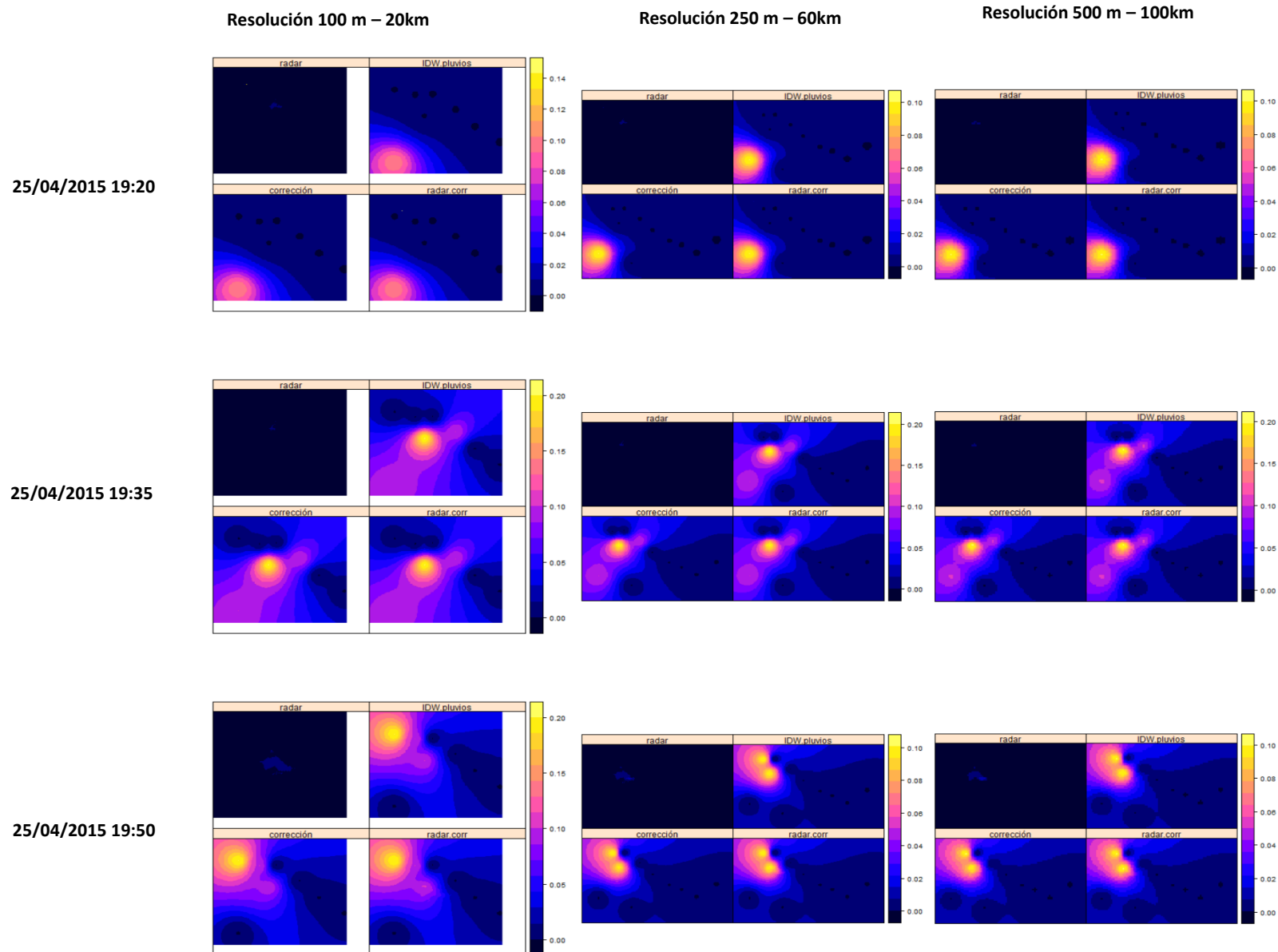


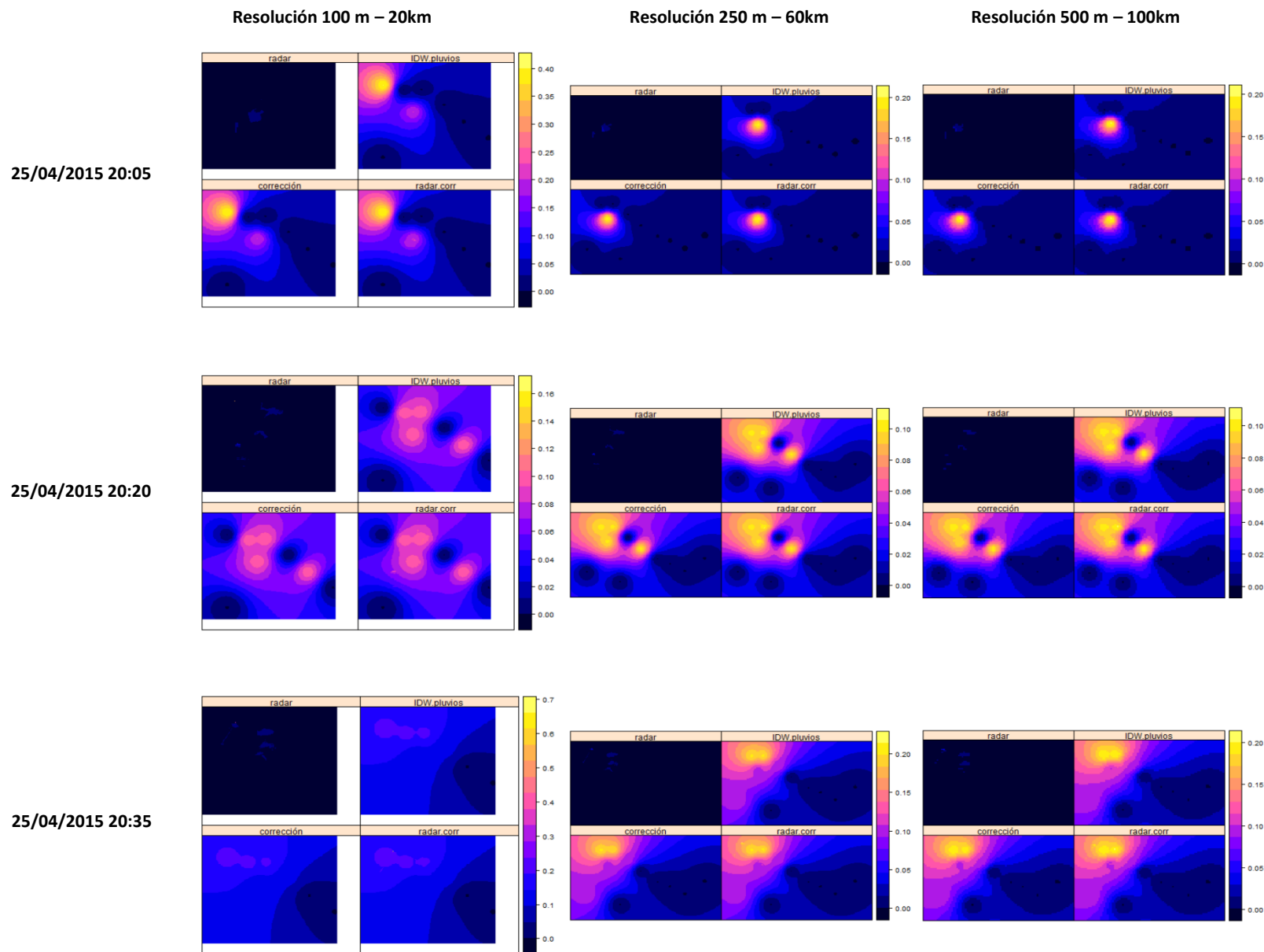
25/04/2015 18:50

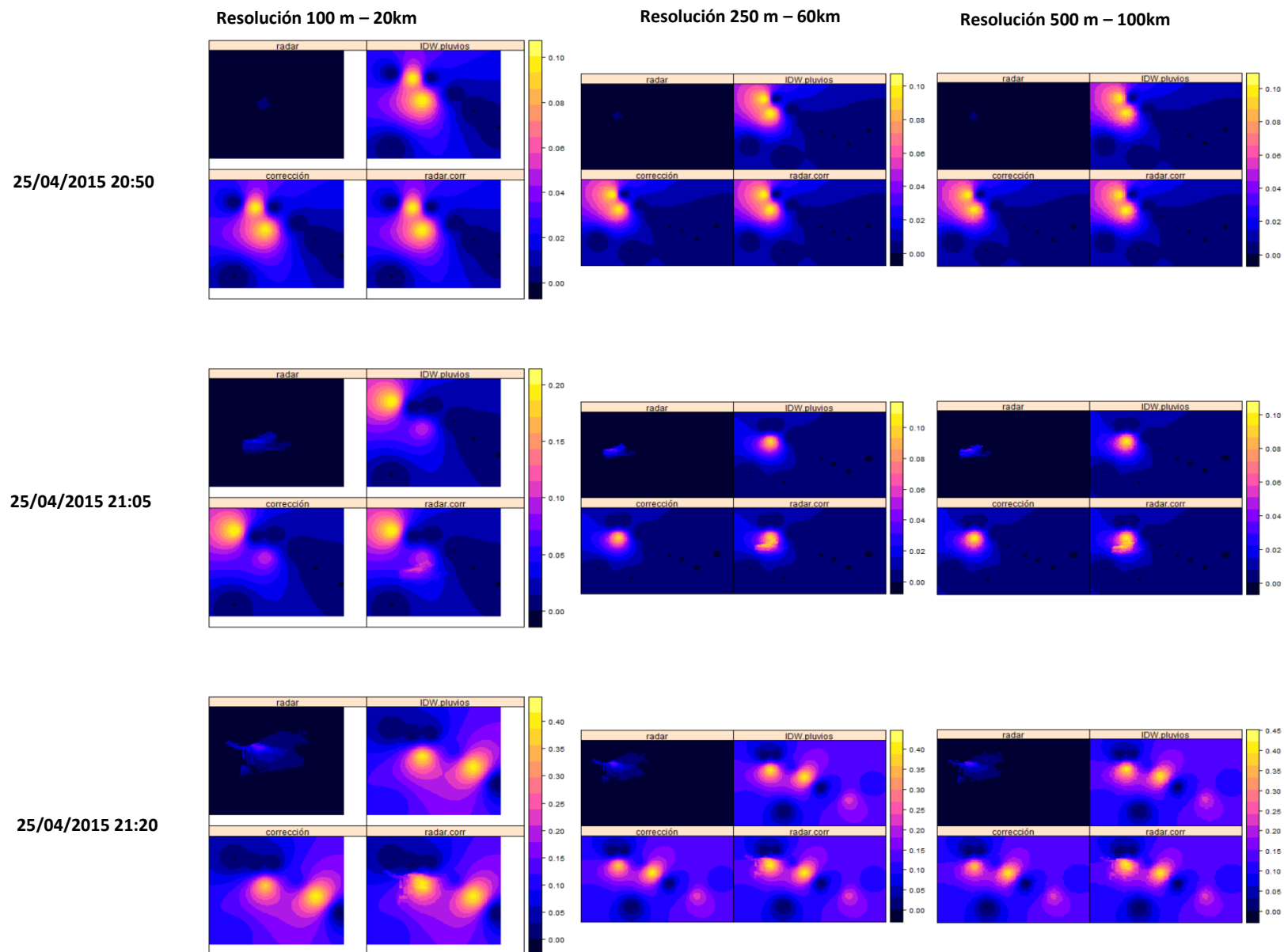


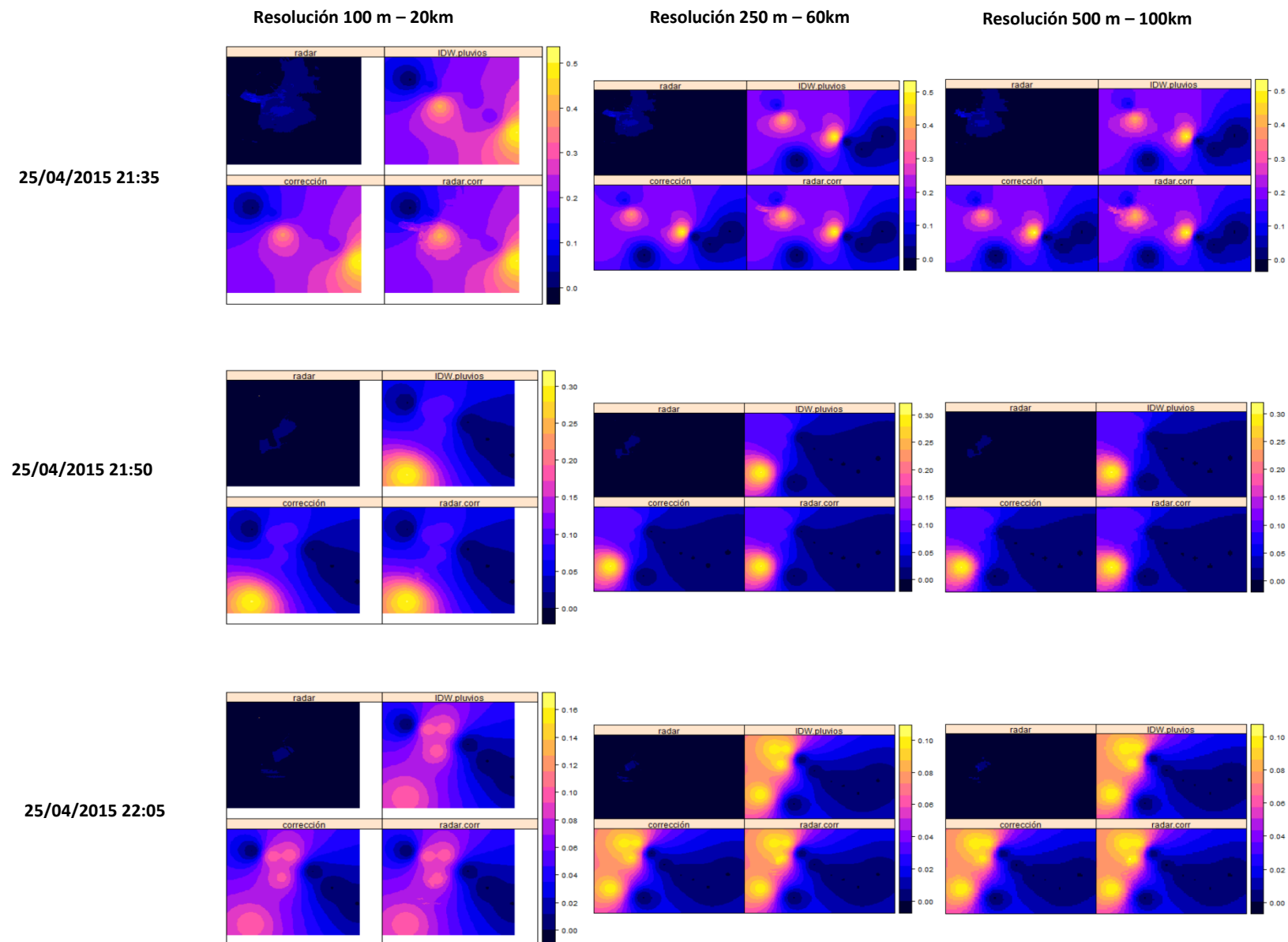
25/04/2015 19:05

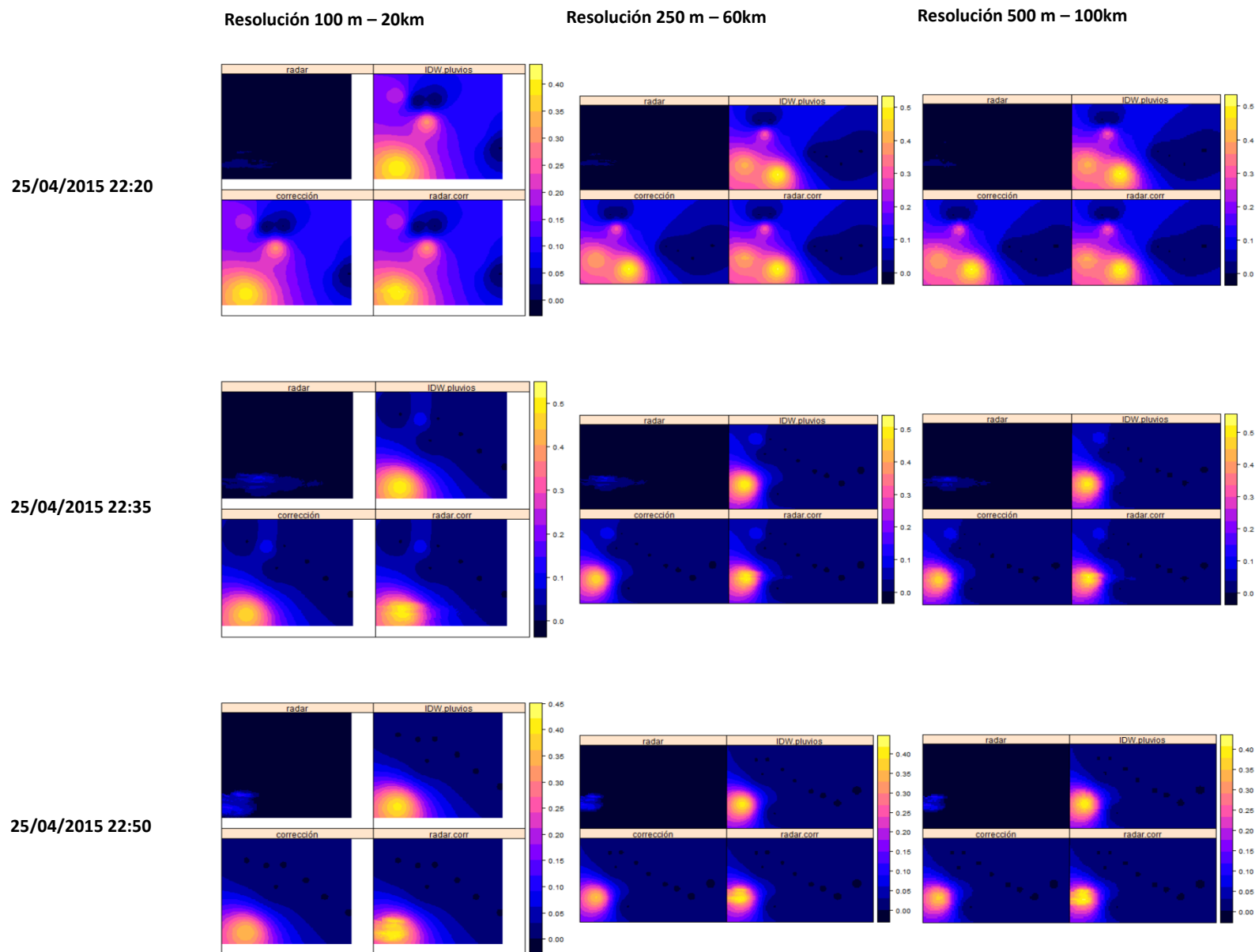


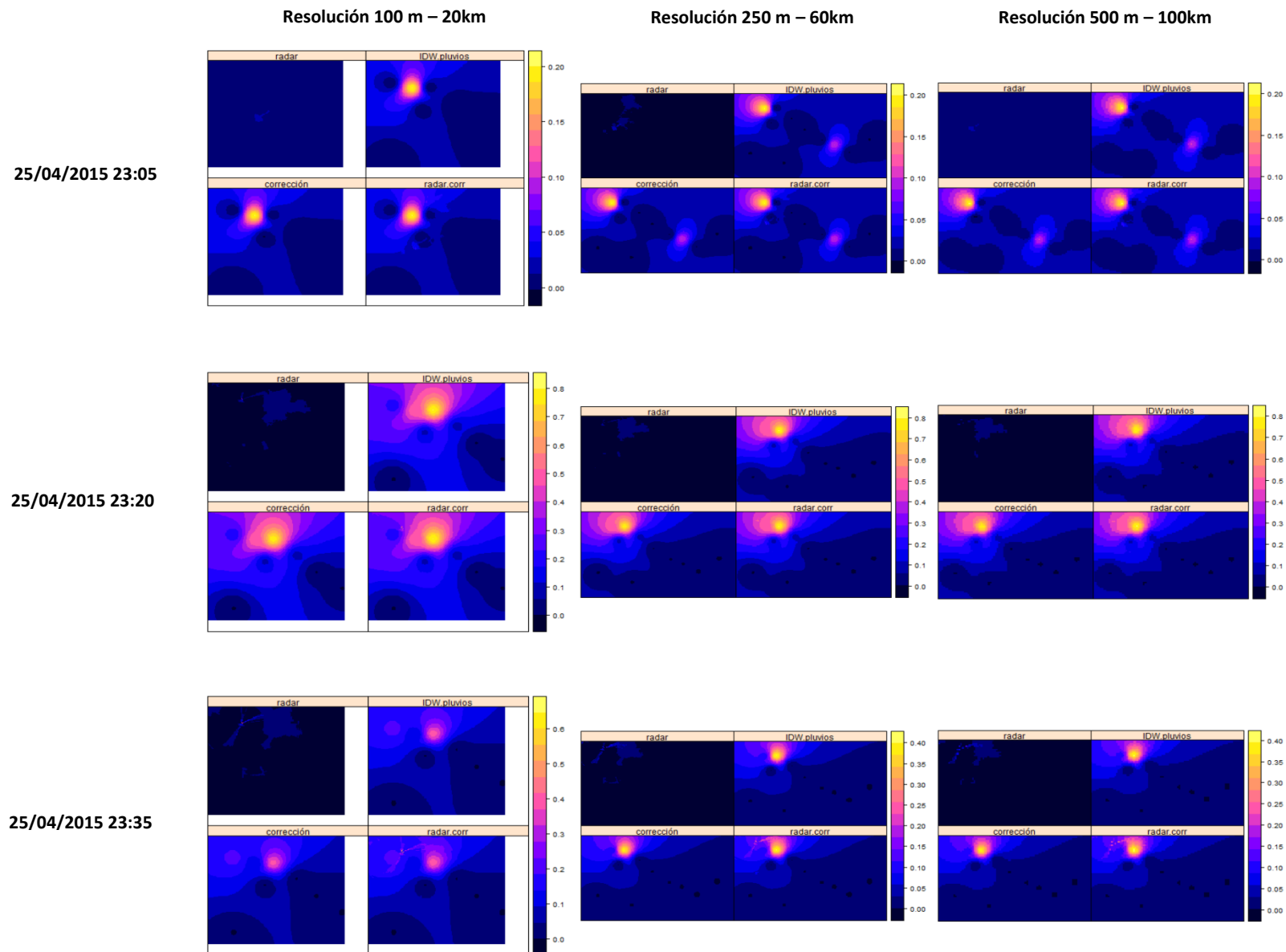




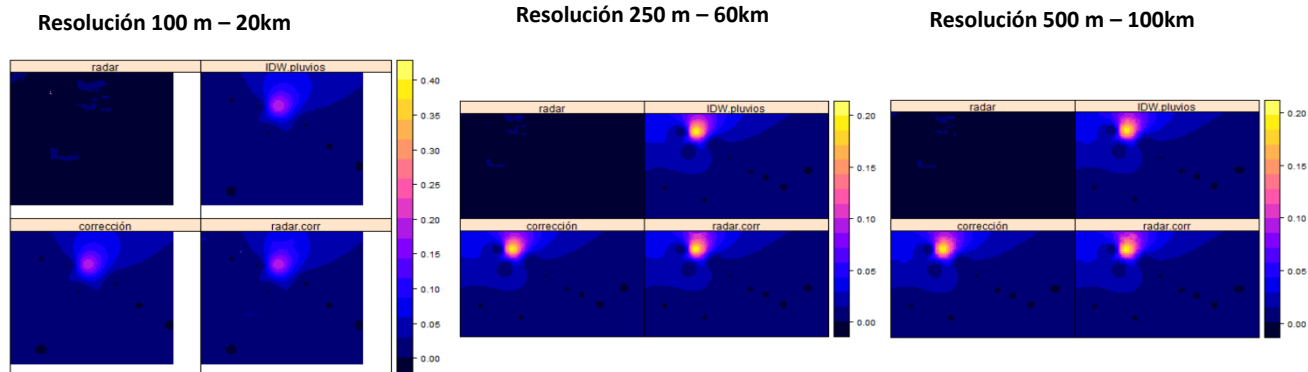




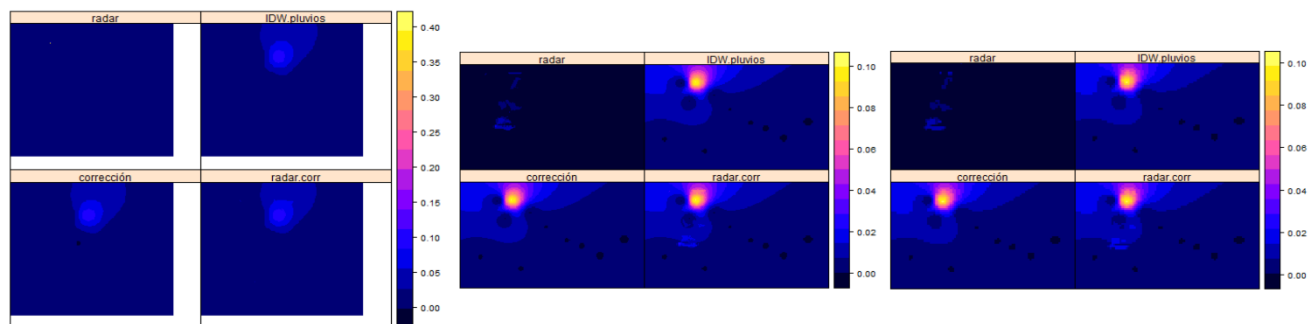




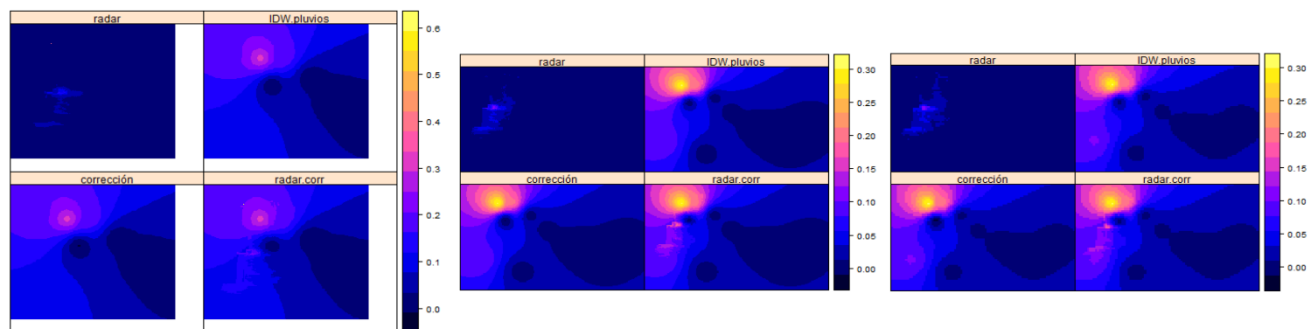
25/04/2015 23:50



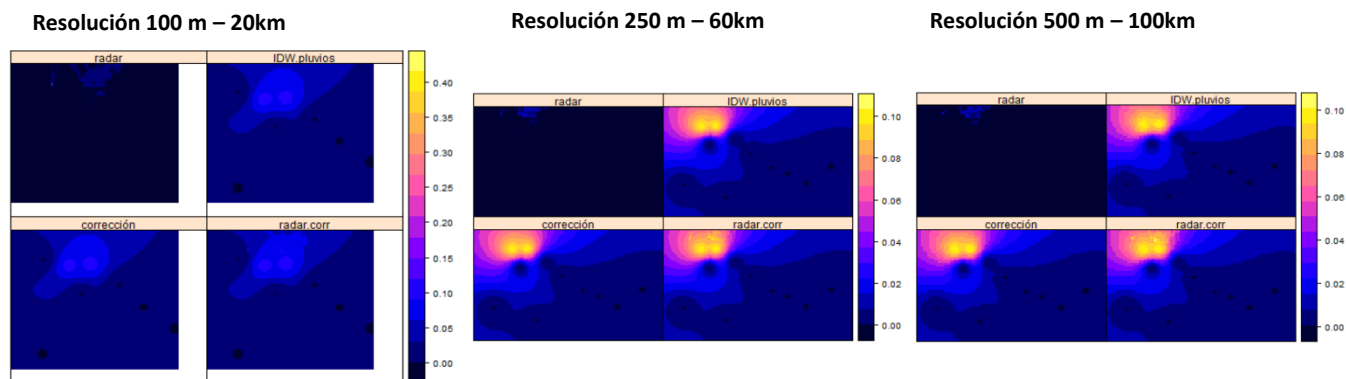
25/04/2015 00:05



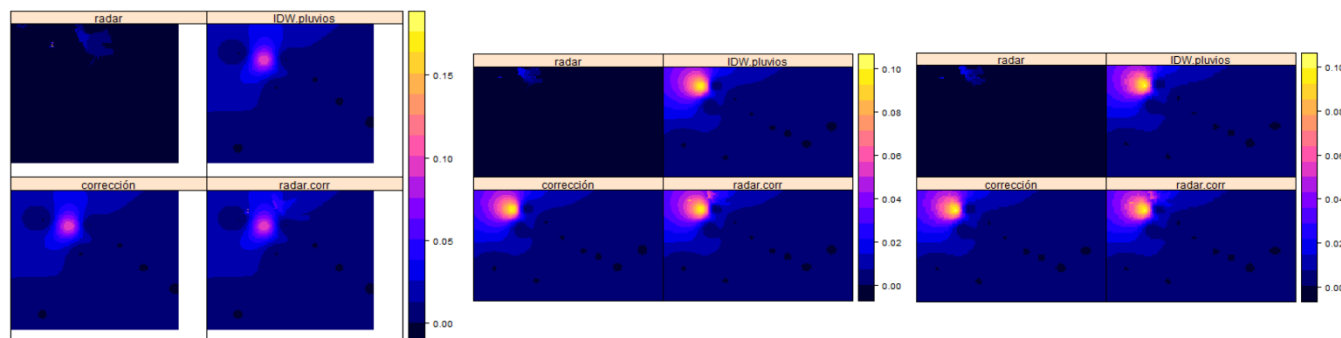
25/04/2015 00:20



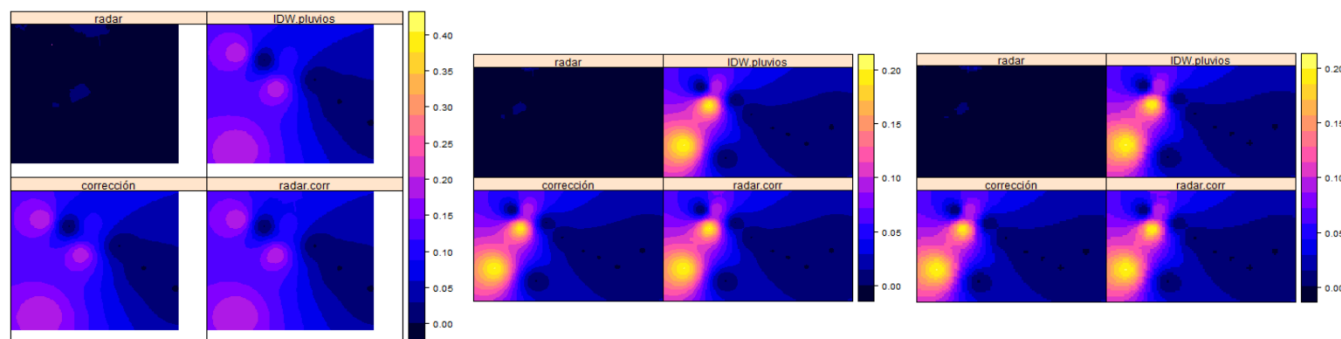
25/04/2015 00:35

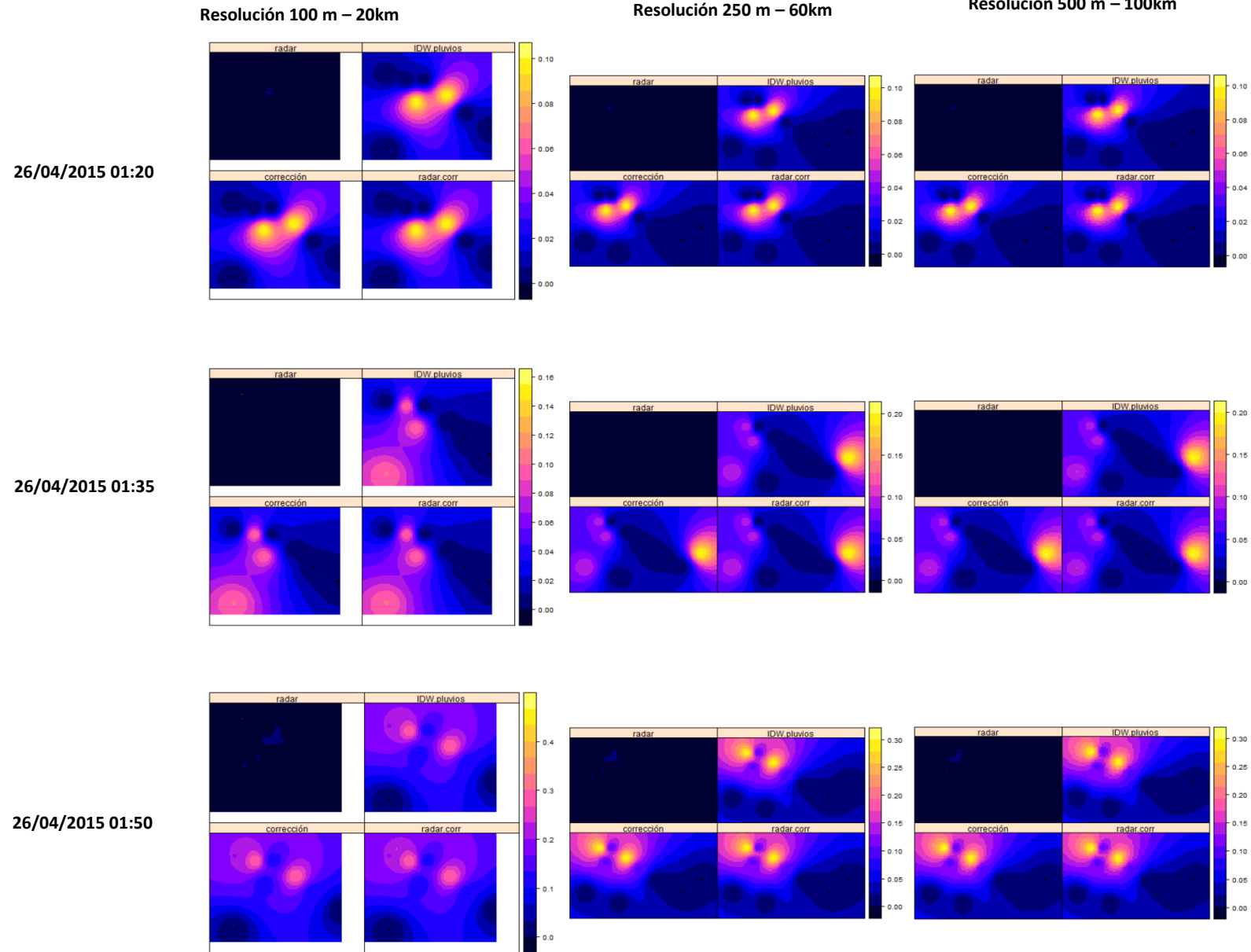


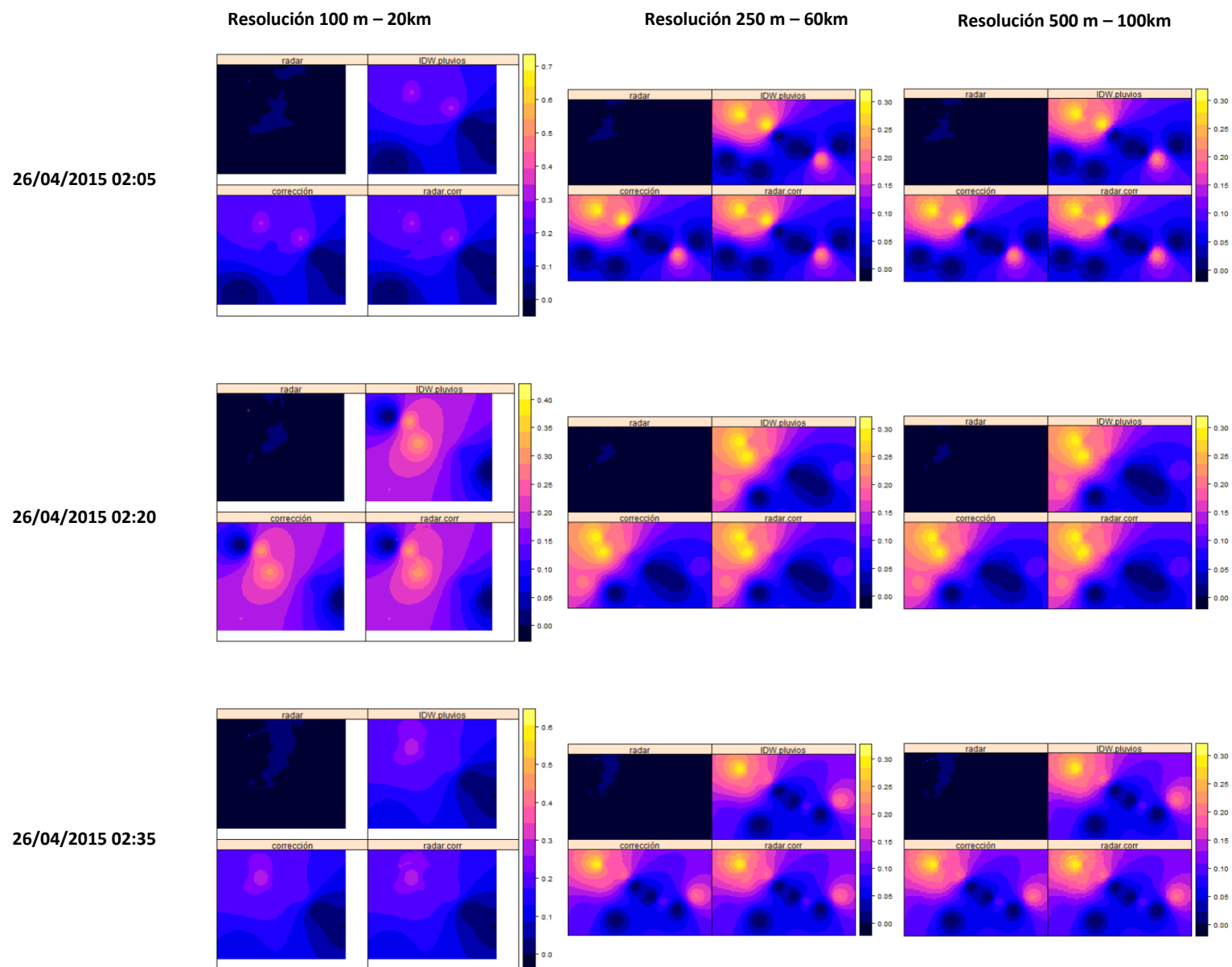
26/04/2015 00:50

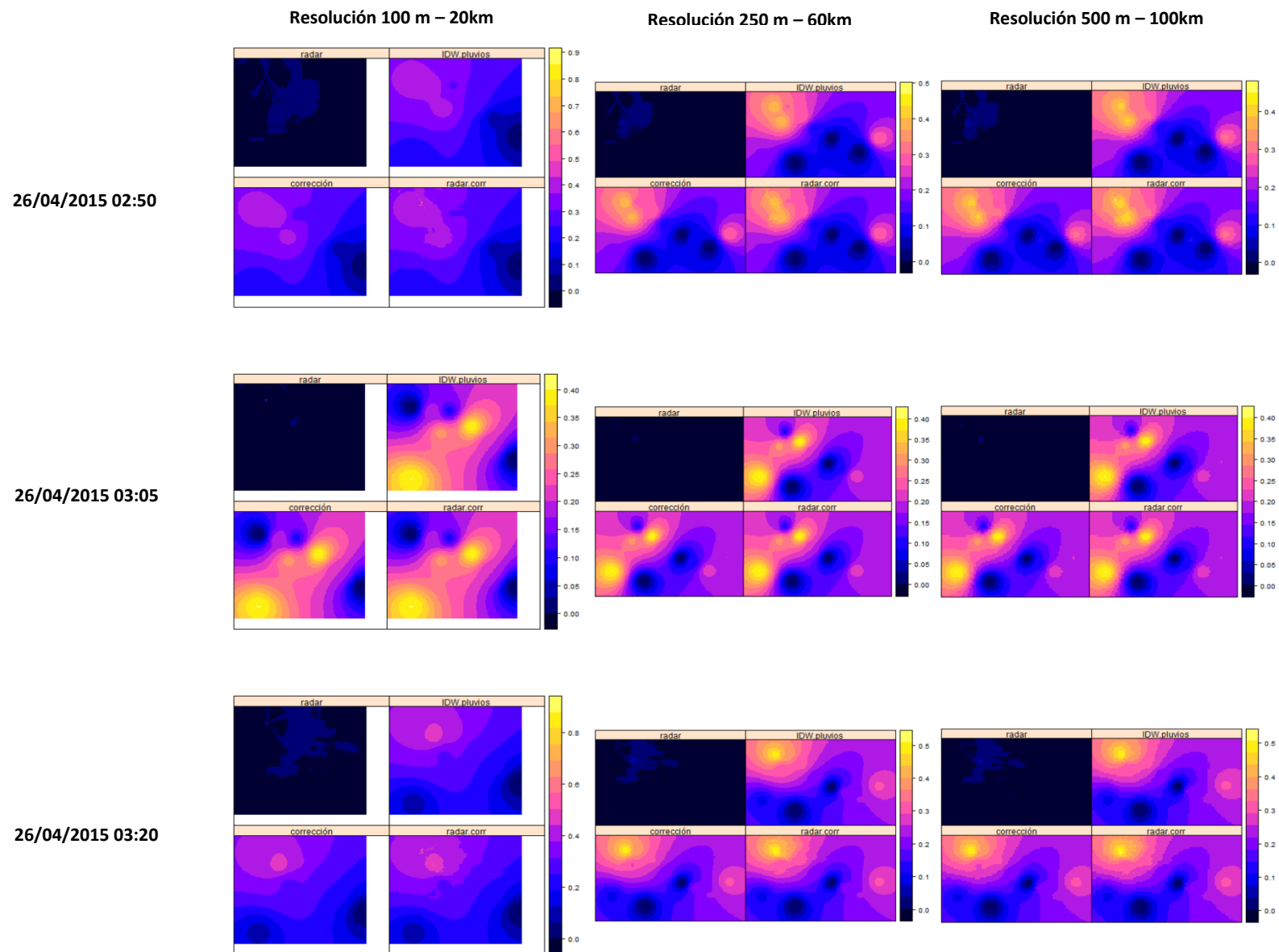


26/04/2015 01:05

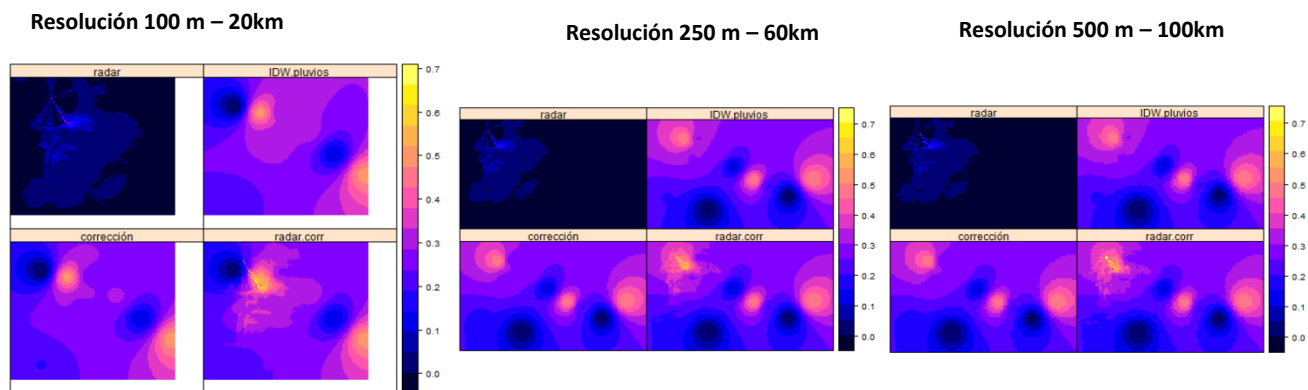




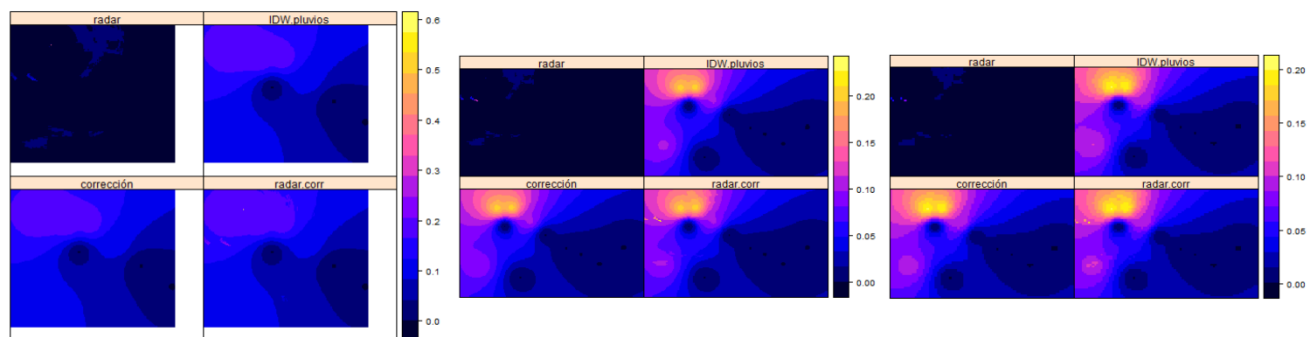




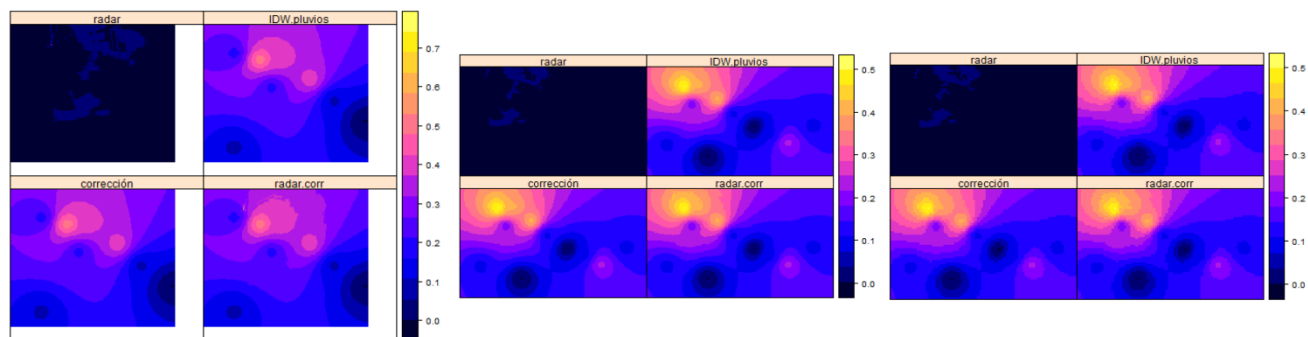
26/04/2015 03:35



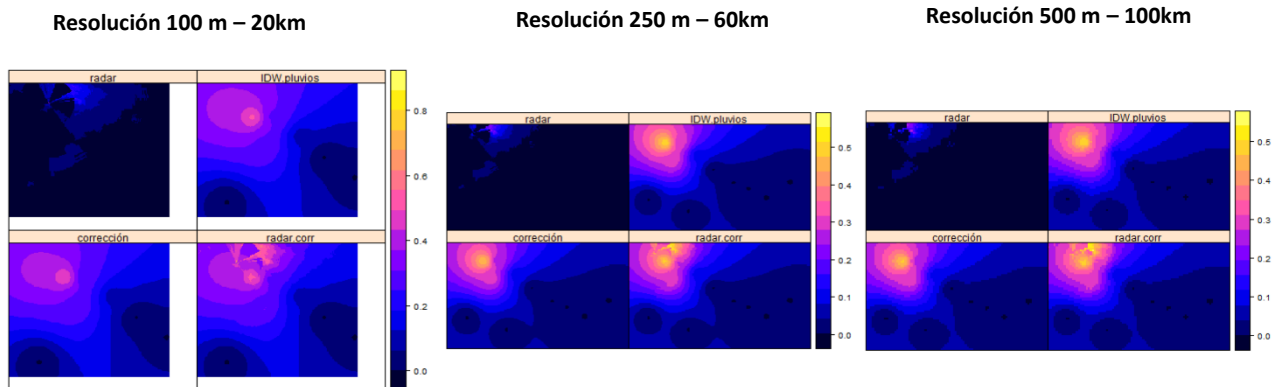
26/04/2015 03:50



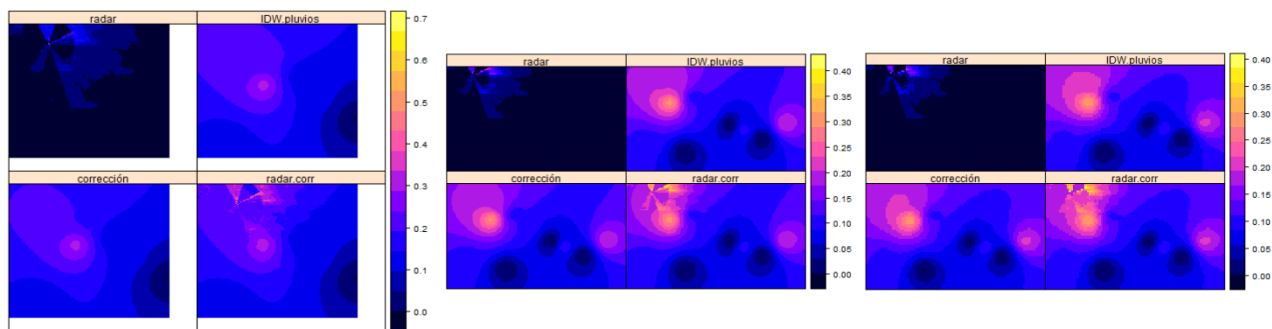
26/04/2015 04:05



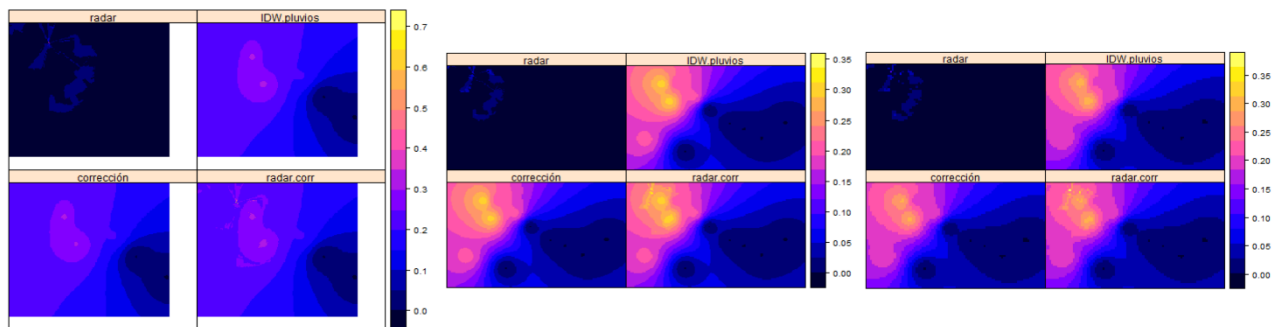
26/04/2015 04:20



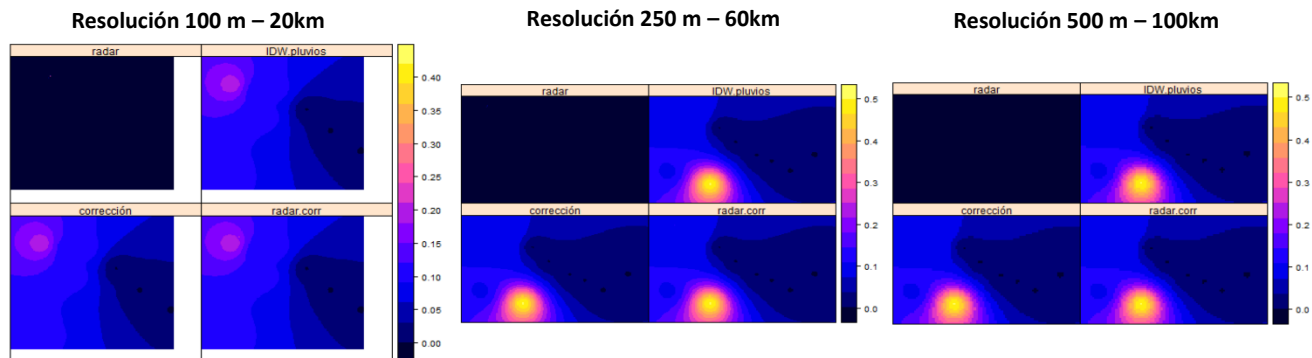
26/04/2015 04:35



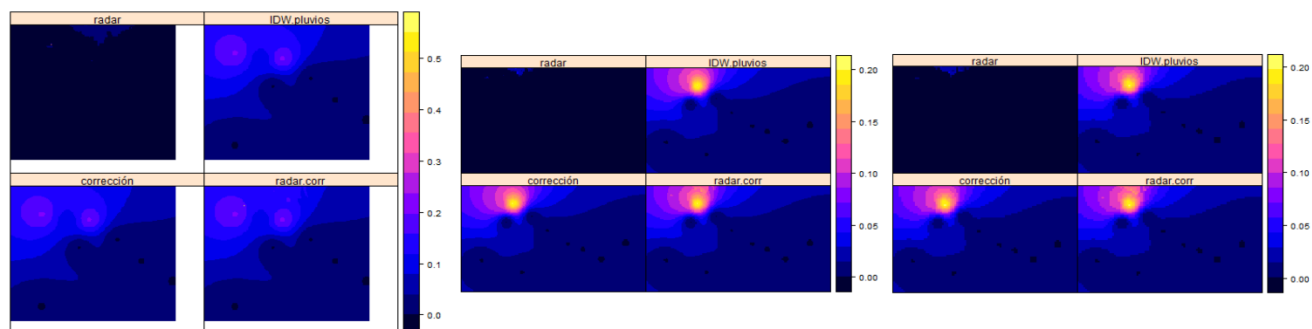
26/04/2015 04:50



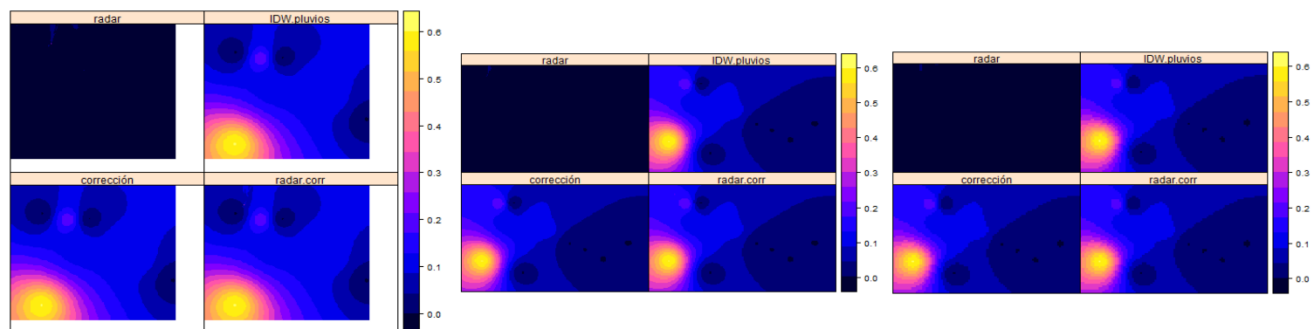
26/04/2015 05:05



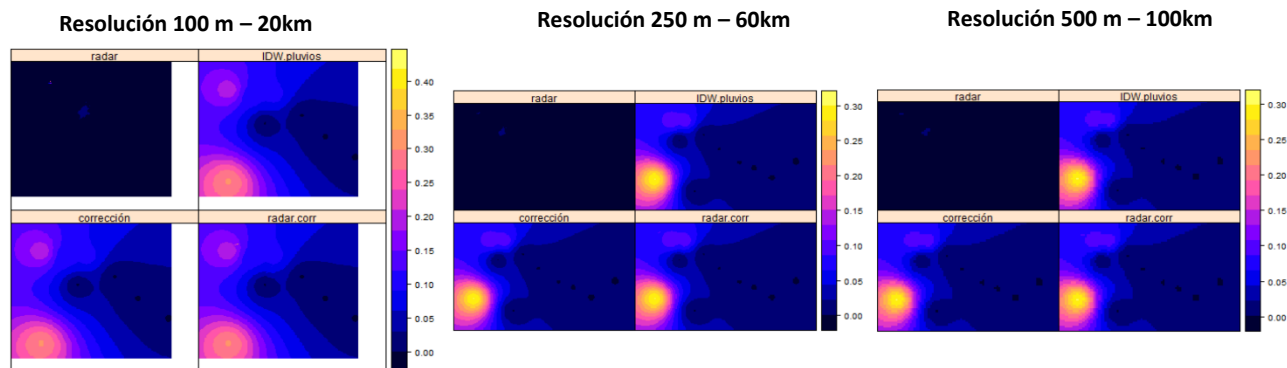
26/04/2015 05:20



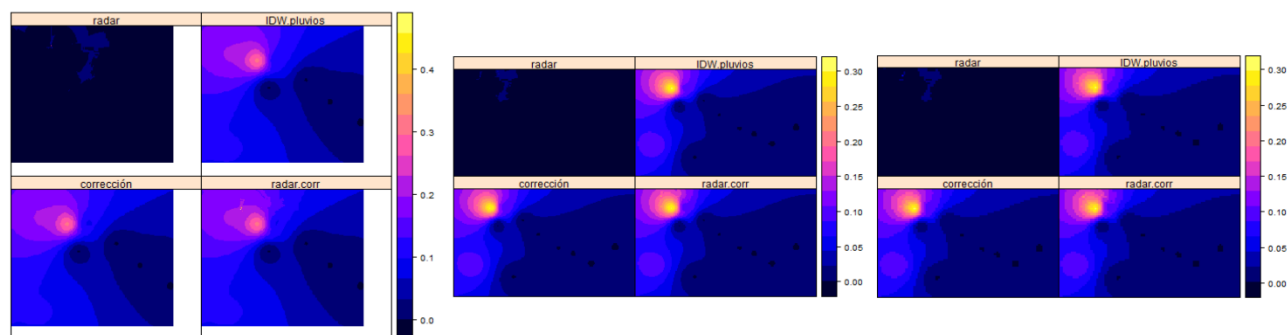
26/04/2015 05:35



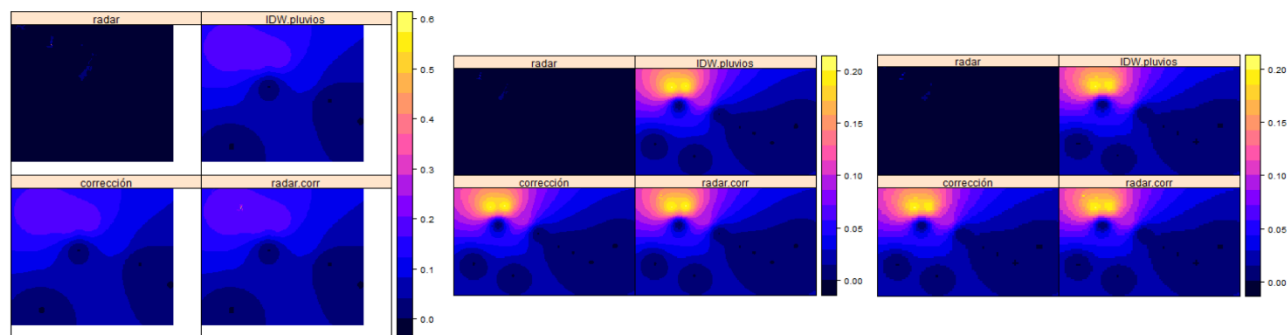
26/04/2015 05:50



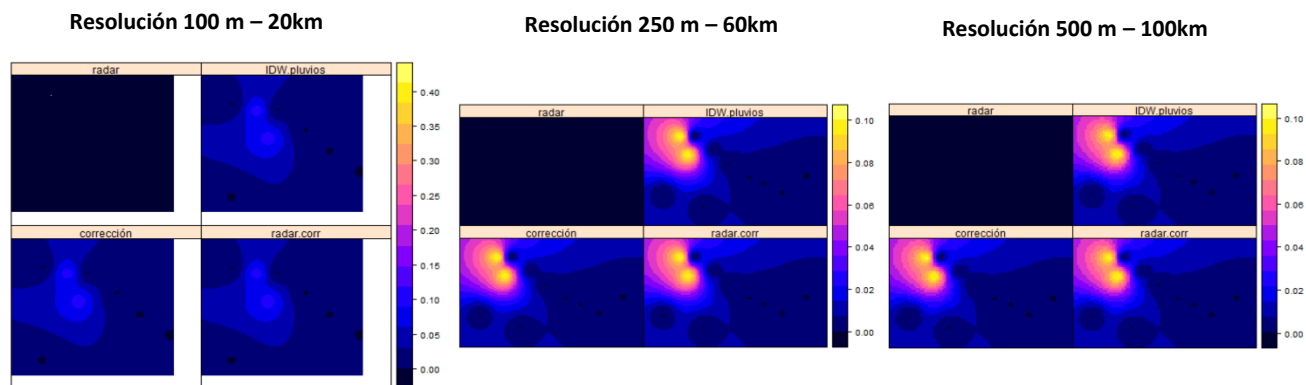
26/04/2015 06:05



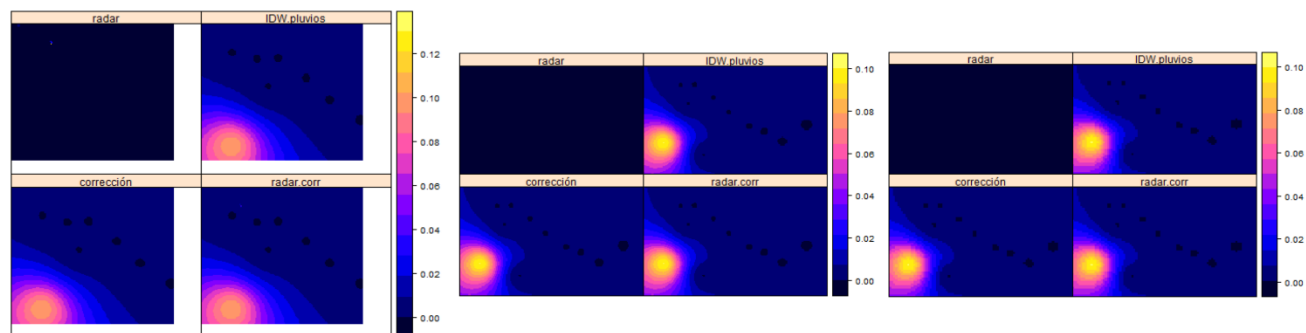
26/04/2015 06:20



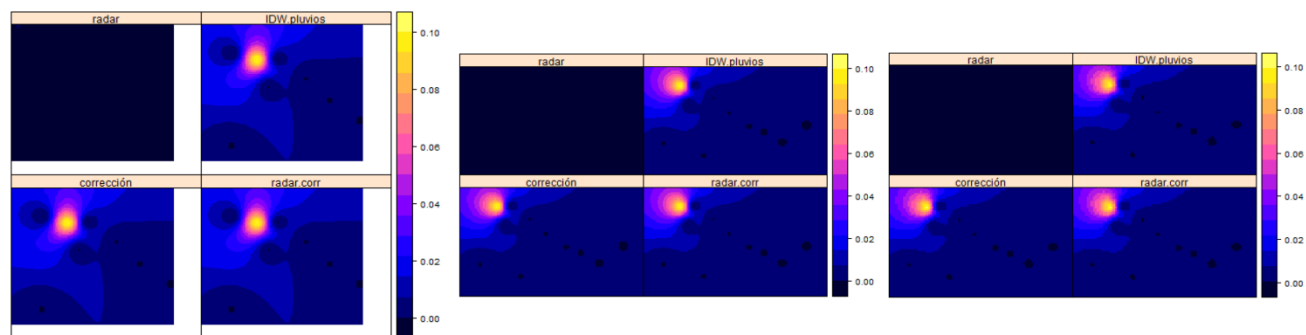
26/04/2015 06:35



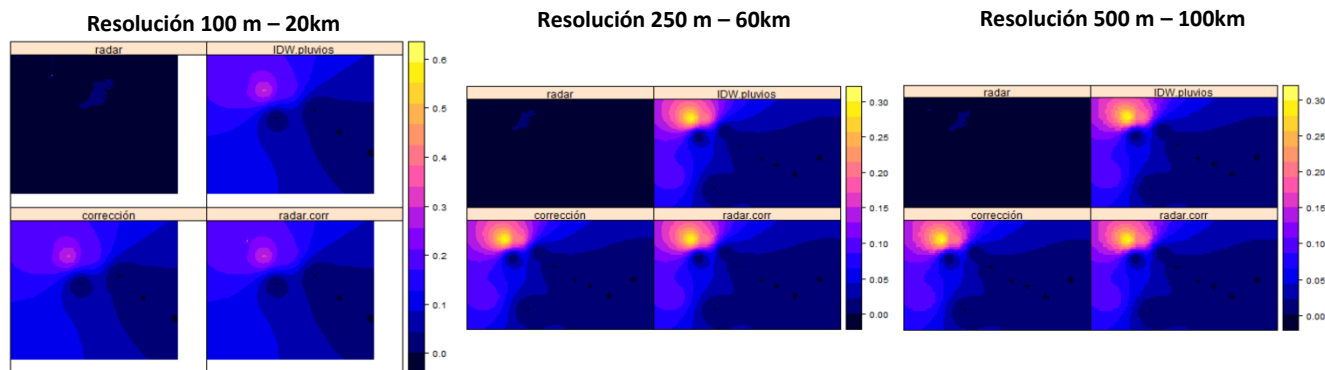
26/04/2015 06:50



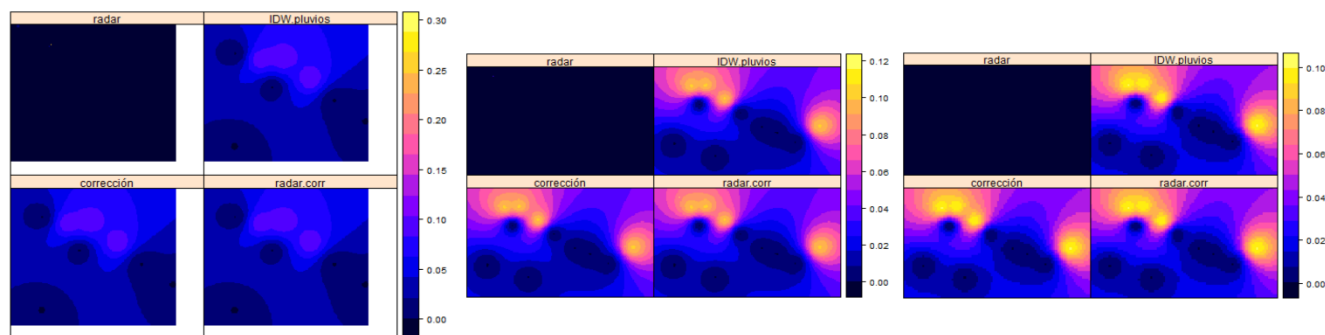
26/04/2015 07:05



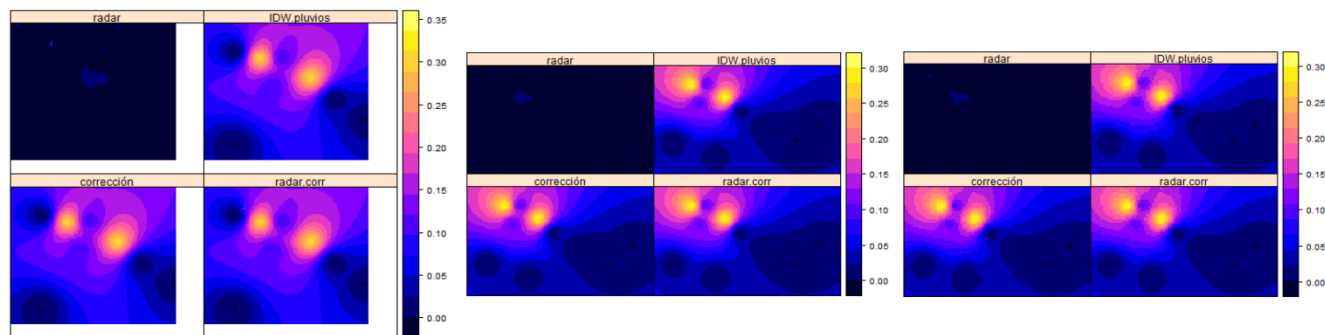
26/04/2015 07:20



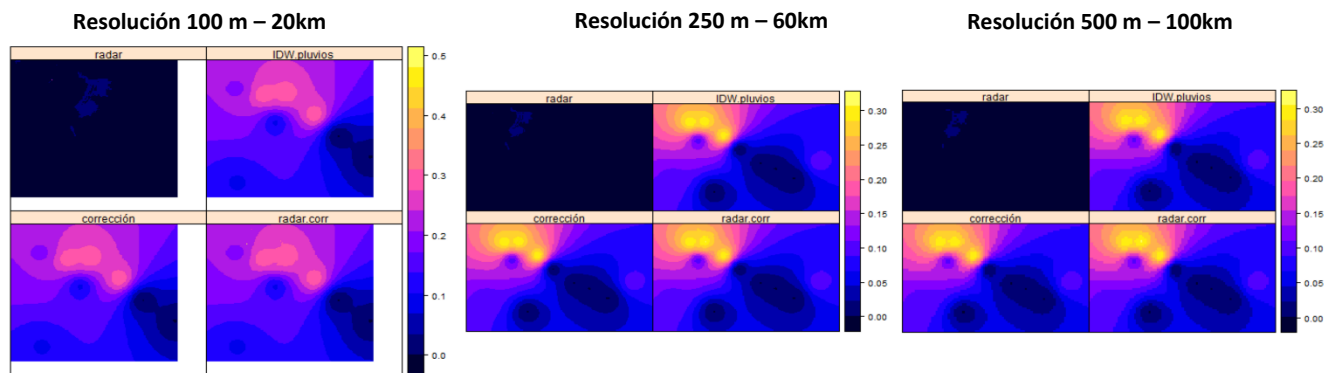
26/04/2015 07:35



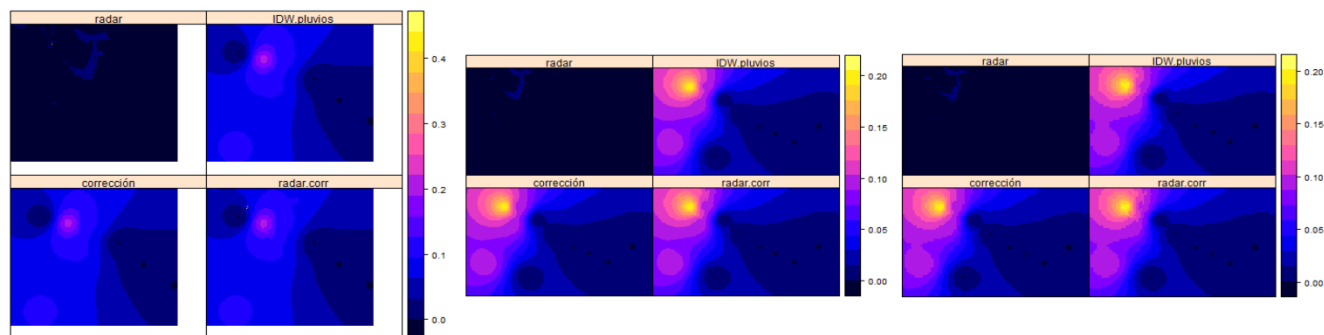
26/04/2015 07:50



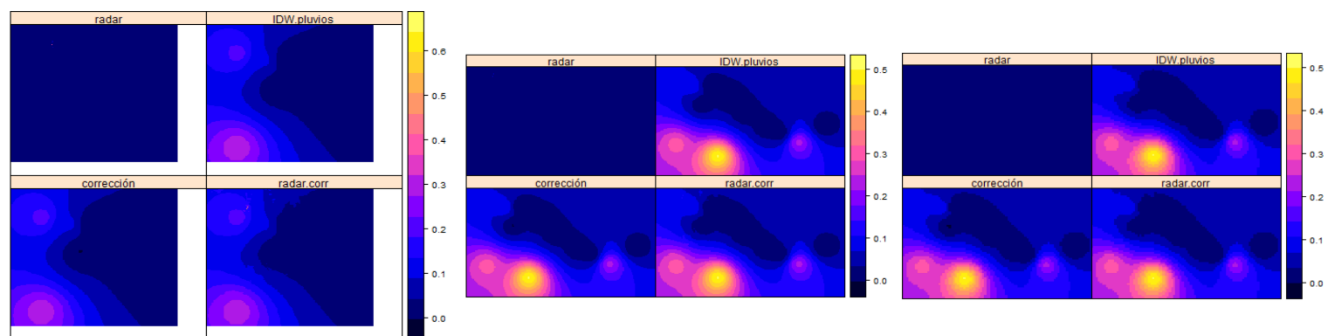
26/04/2015 08:05

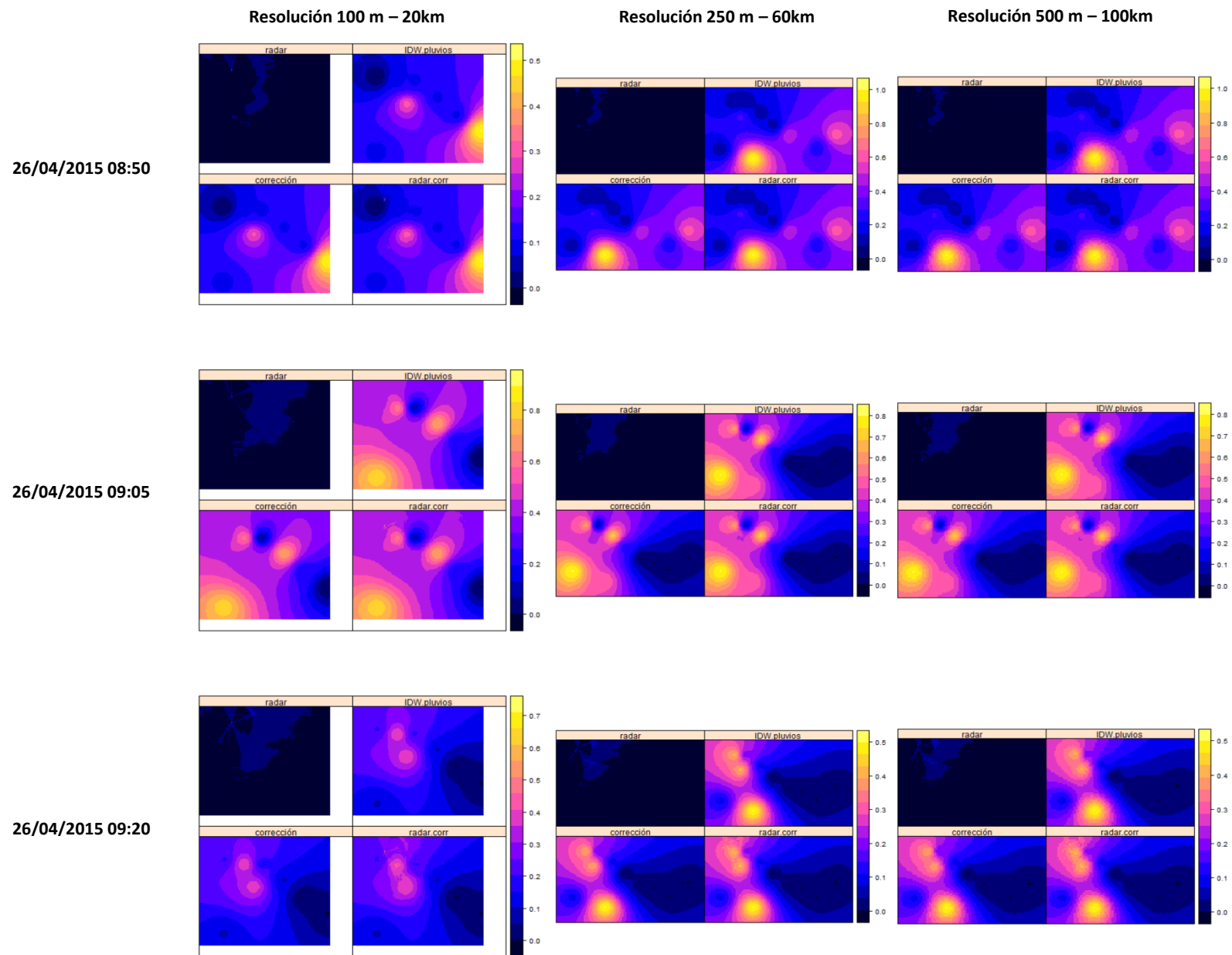


26/04/2015 08:20

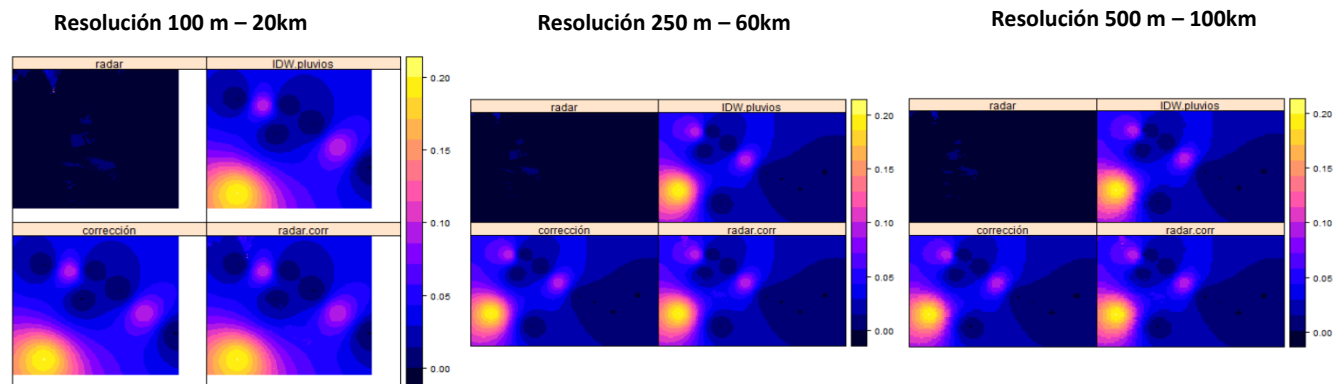


26/04/2015 08:35

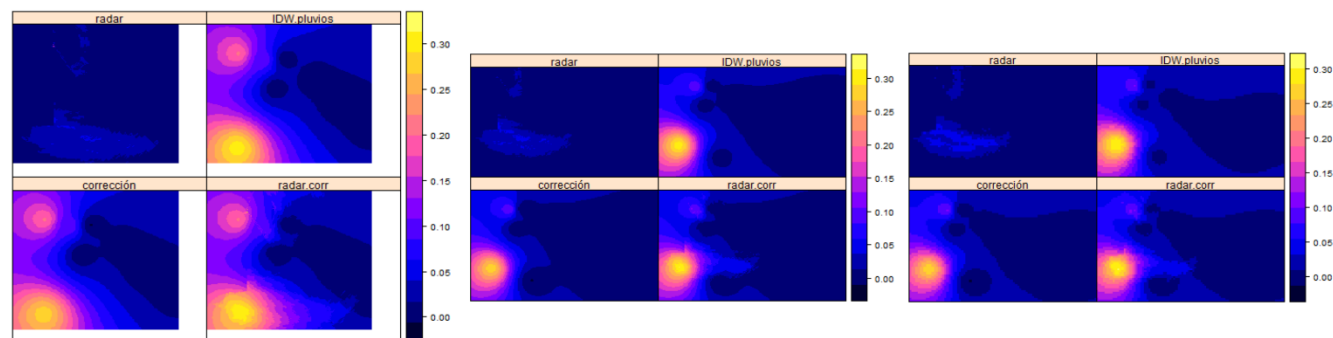




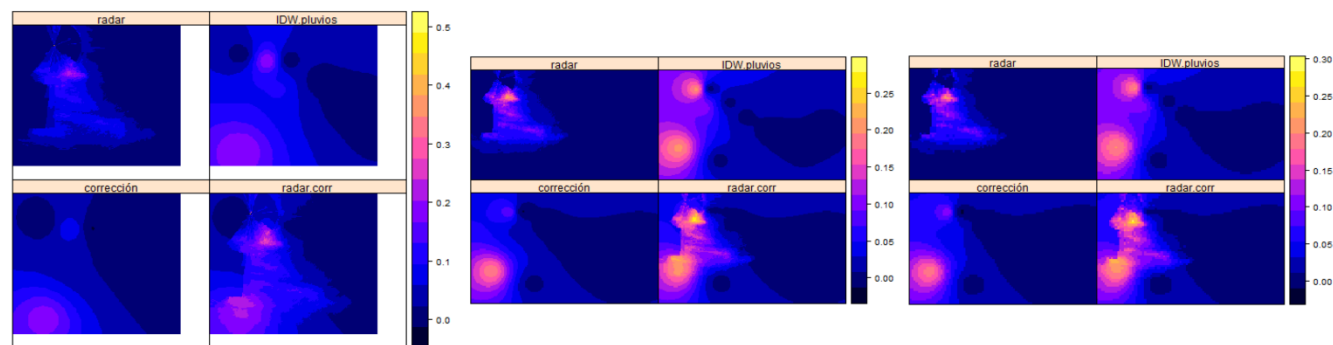
26/04/2015 09:35

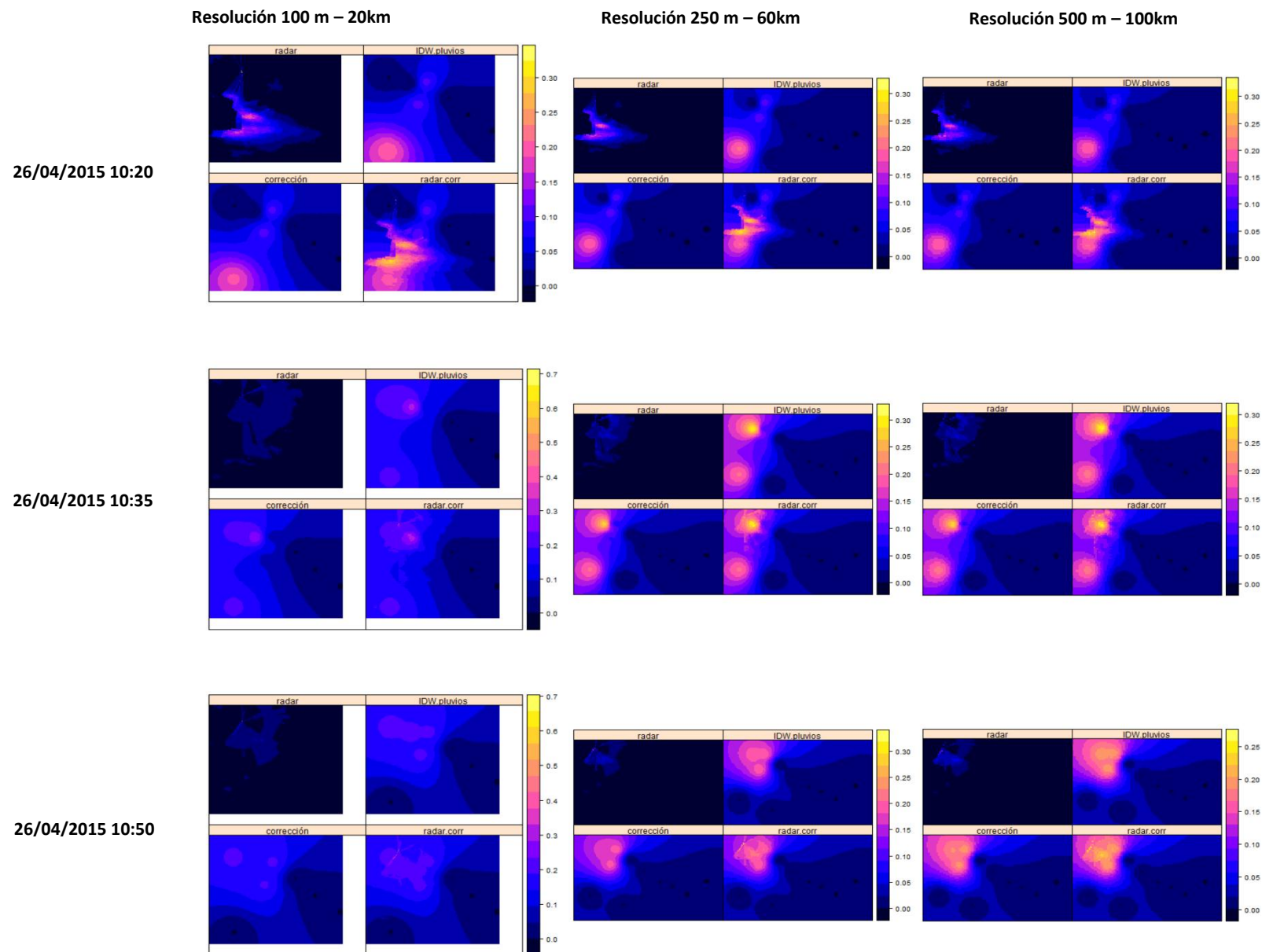


26/04/2015 09:50

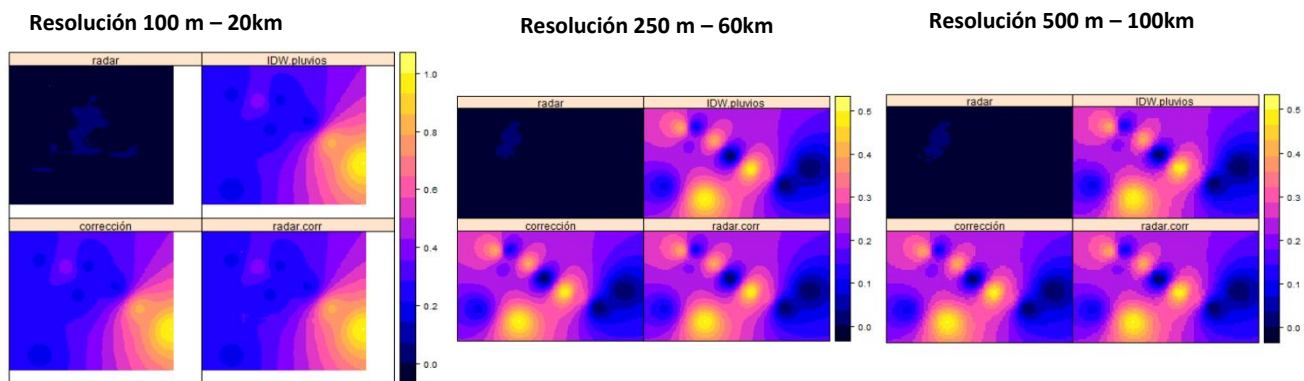


26/04/2015 10:05

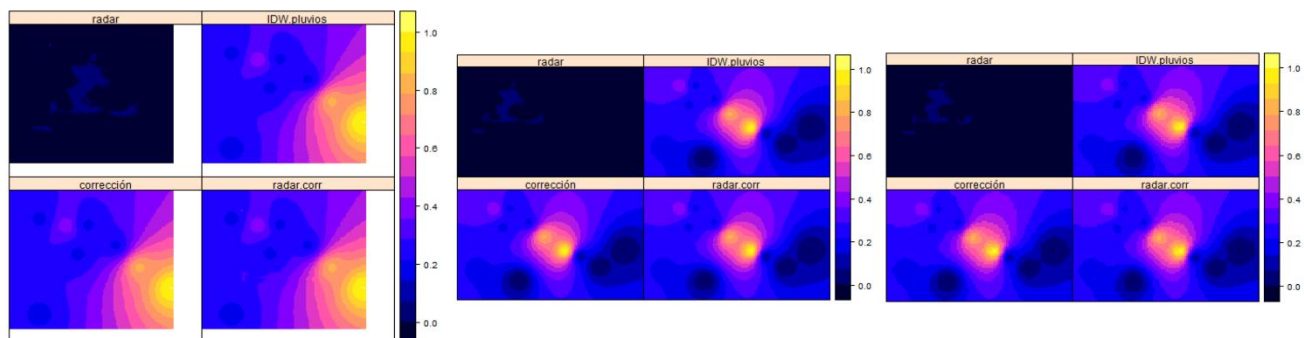




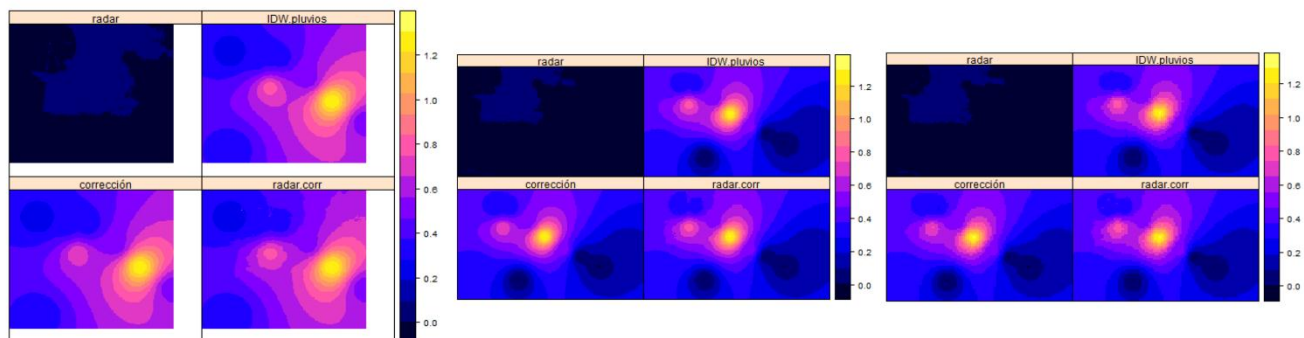
26/04/2015 11:05



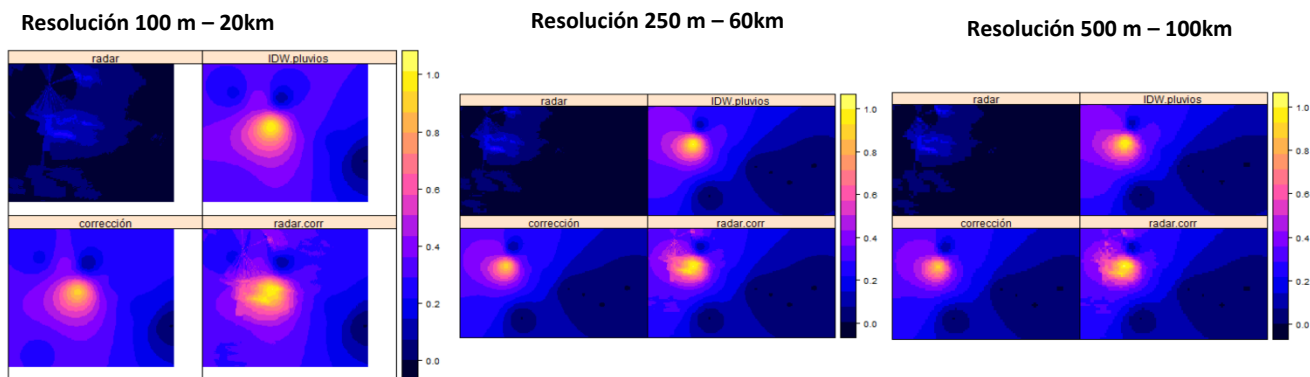
26/04/2015 11:20



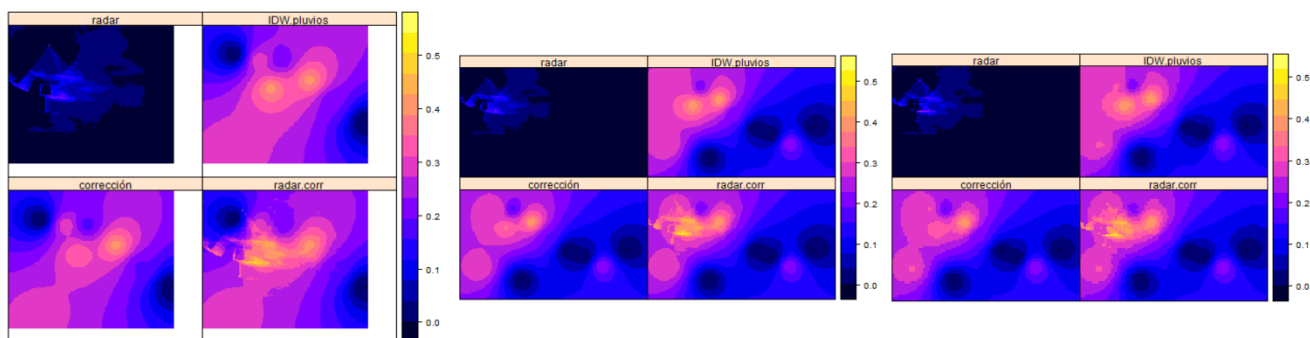
26/04/2015 11:35



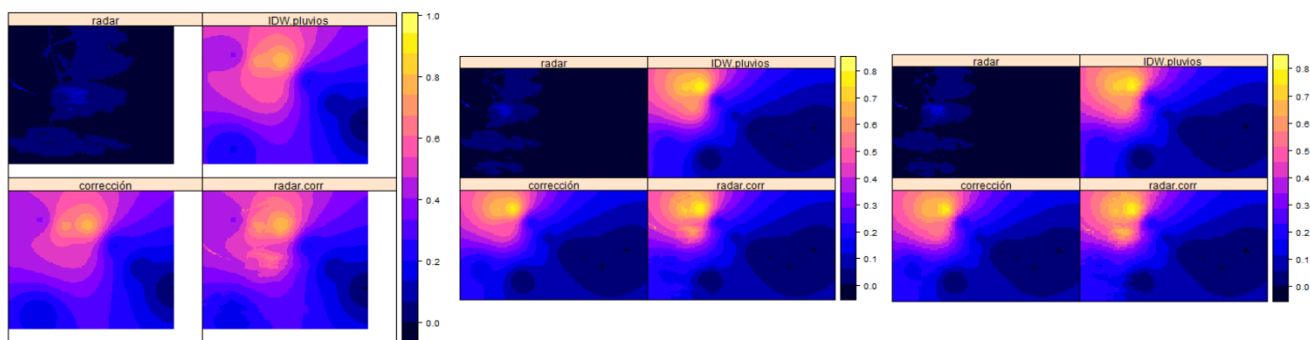
26/04/2015 11:50



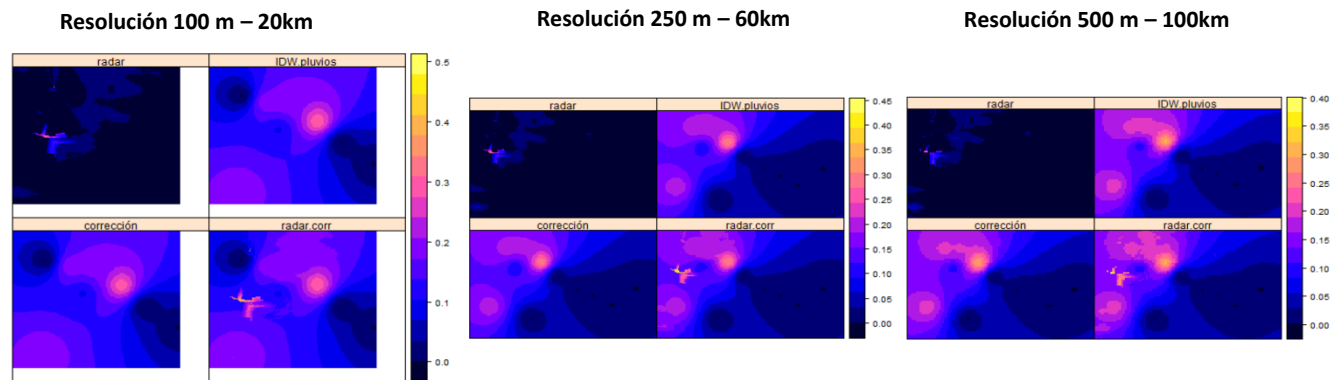
26/04/2015 12:05



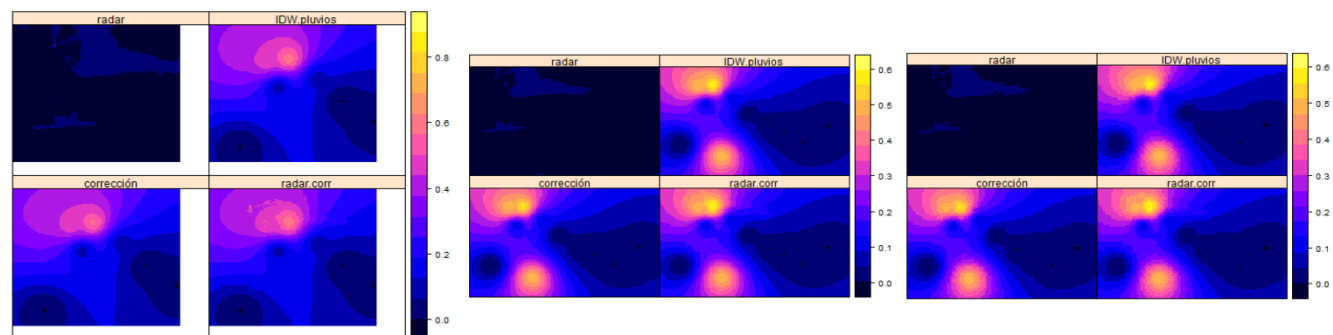
26/04/2015 12:20



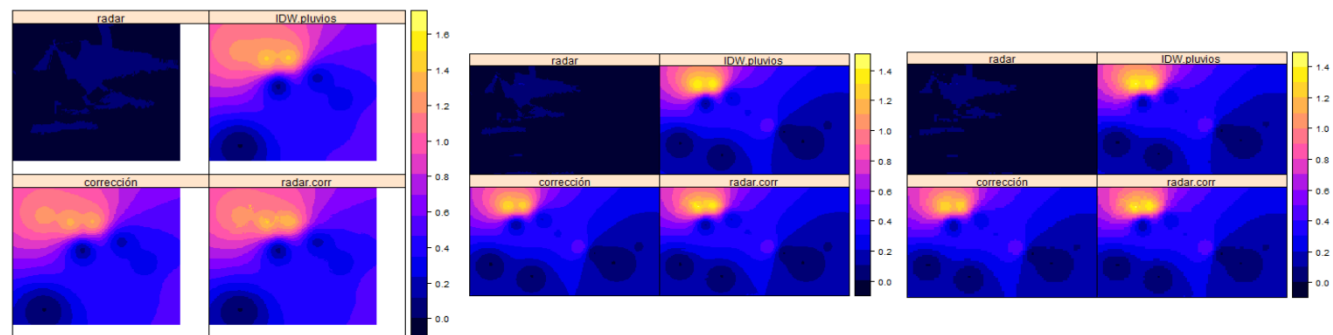
26/04/2015 12:35



26/04/2015 12:50

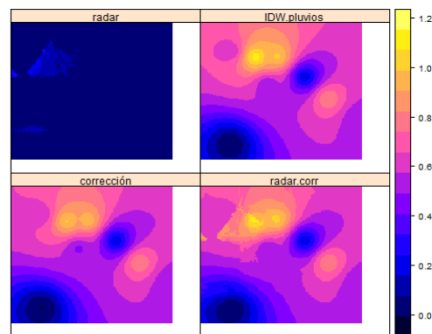


26/04/2015 13:05

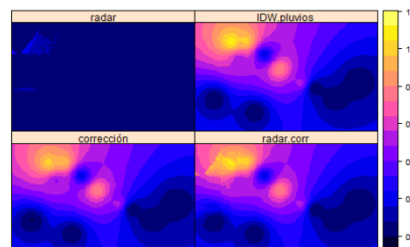


26/04/2015 13:20

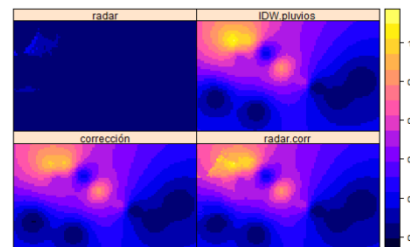
Resolución 100 m – 20km



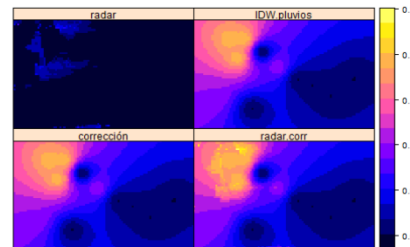
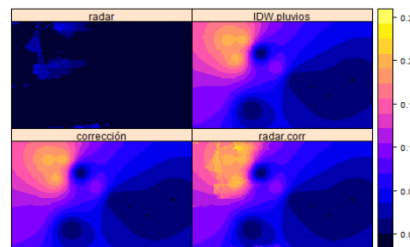
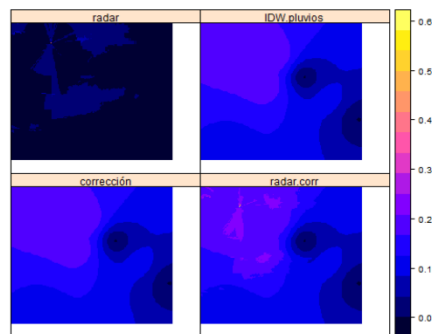
Resolución 250 m – 60km



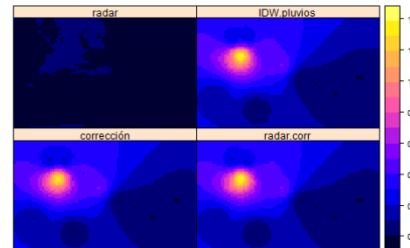
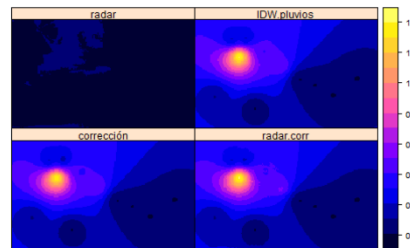
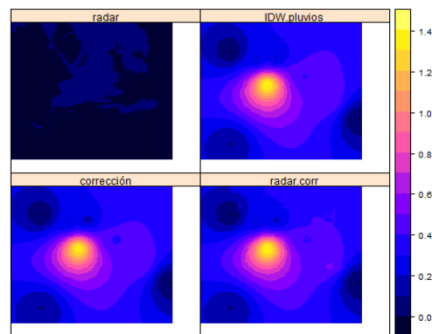
Resolución 500 m – 100km



26/04/2015 13:35

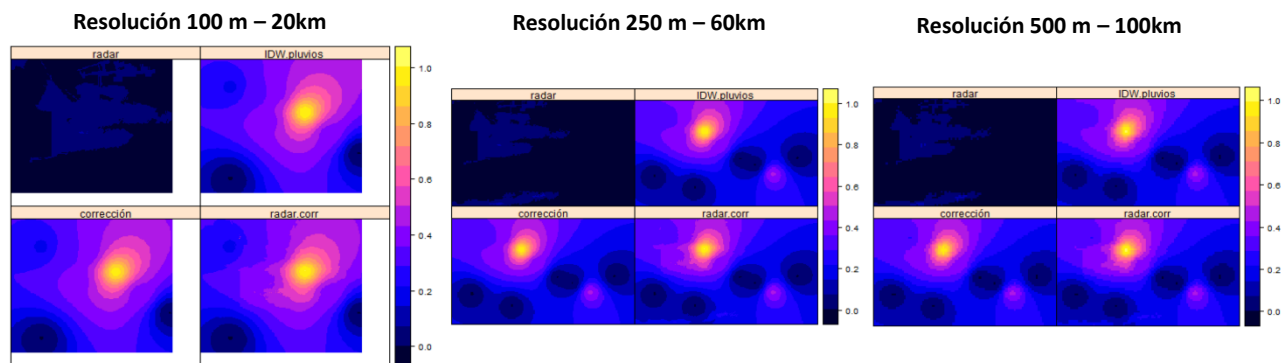


26/04/2015 13:50

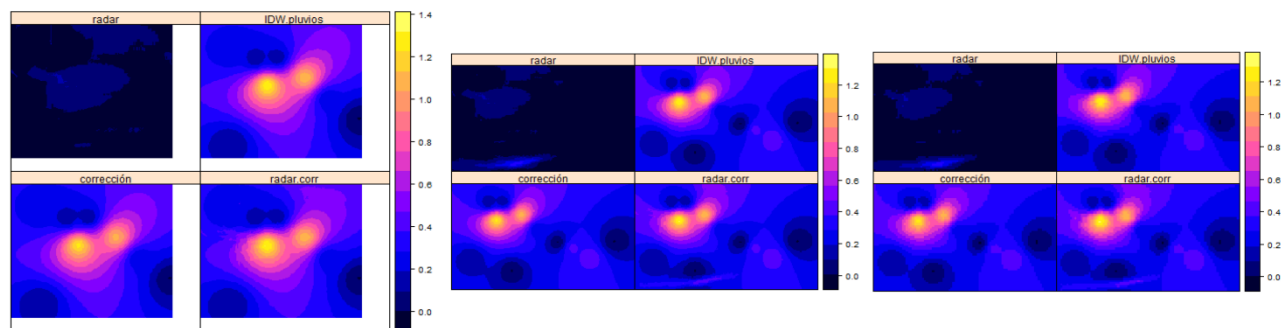


EVENTO 3

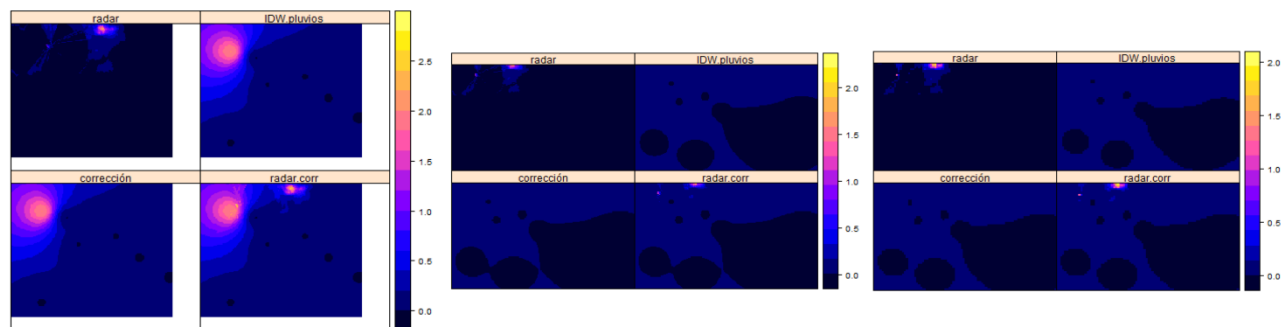
03/05/2015 13:50



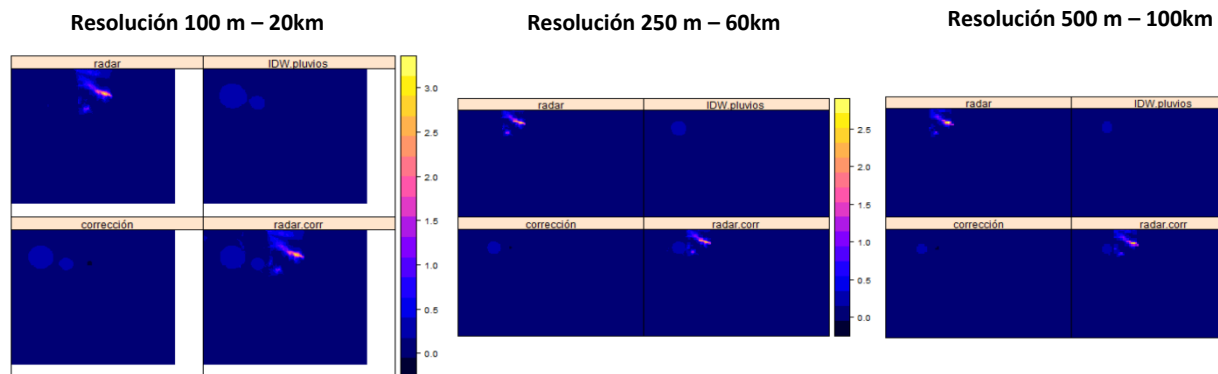
03/05/2015 14:05



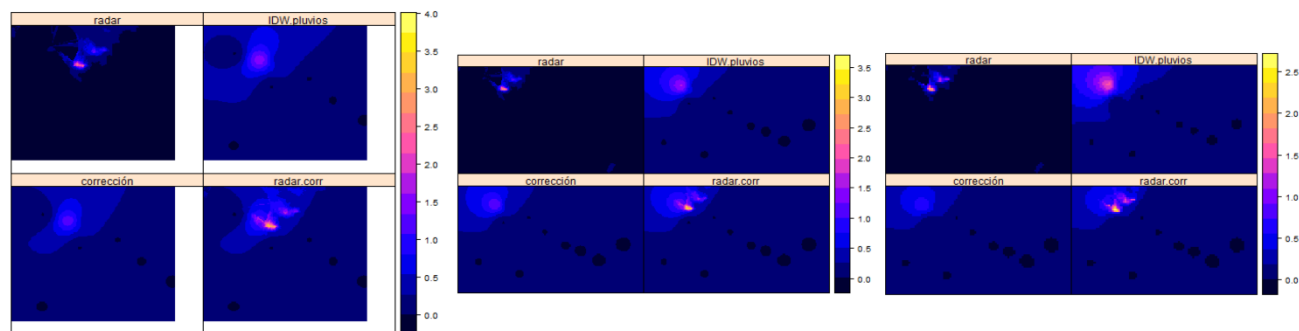
03/05/2015 14:20



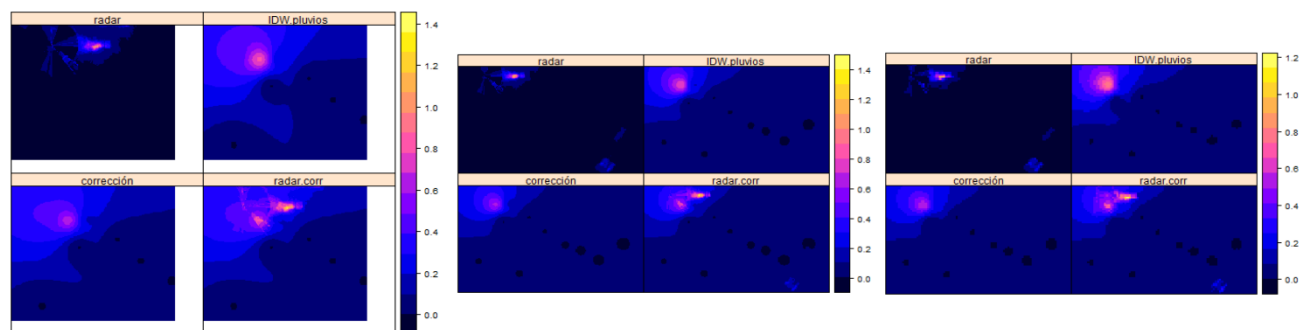
03/05/2015 14:35

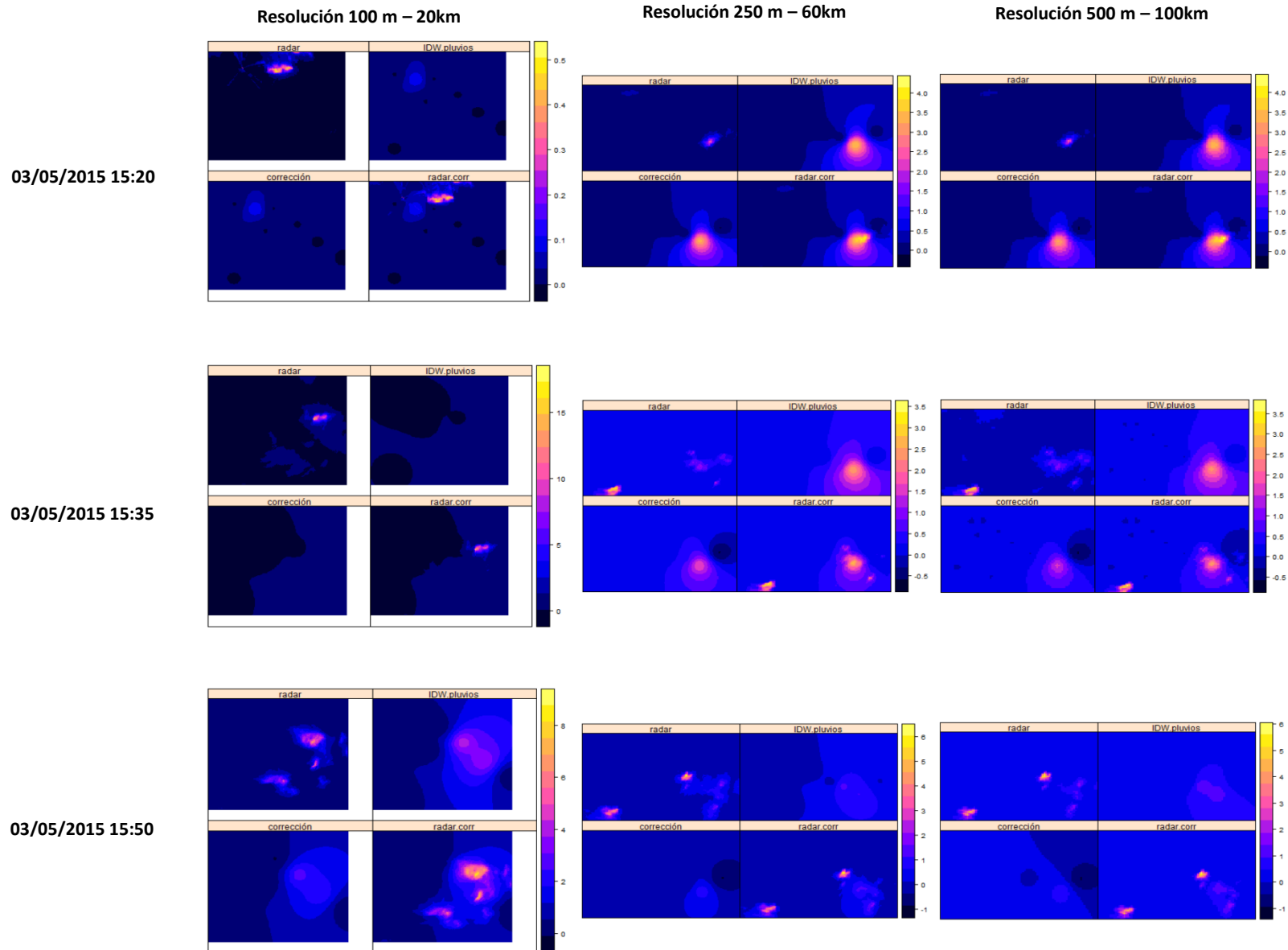


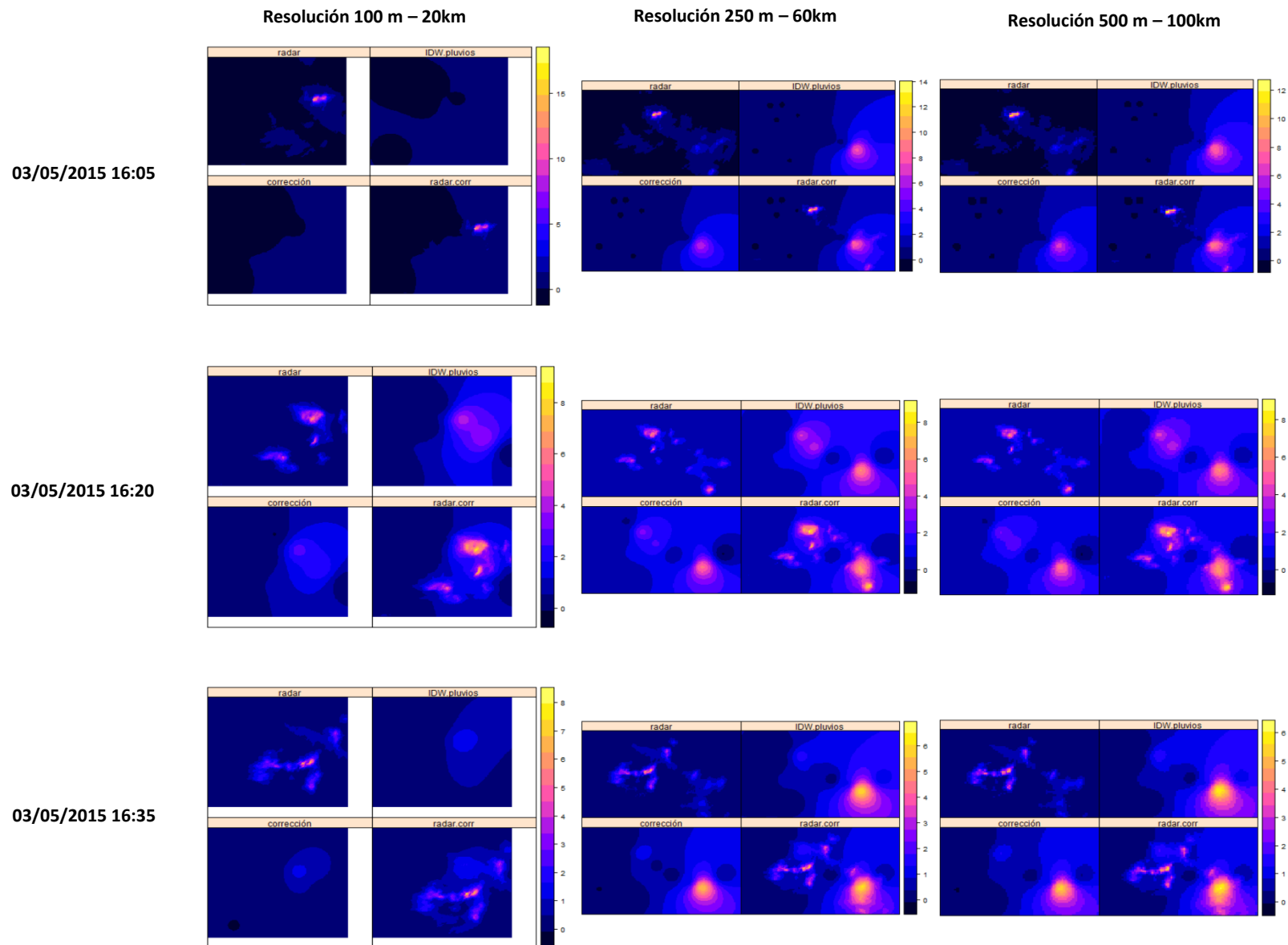
03/05/2015 14:50



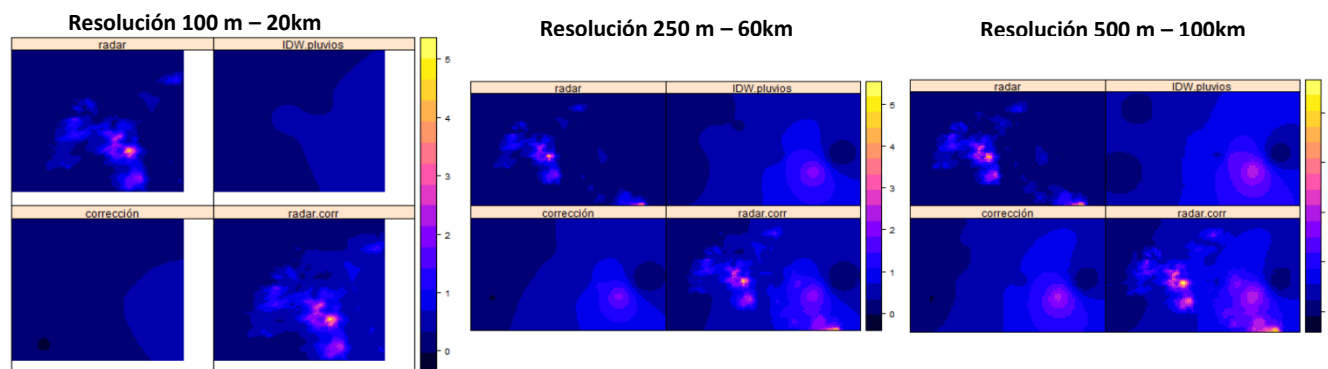
03/05/2015 15:05



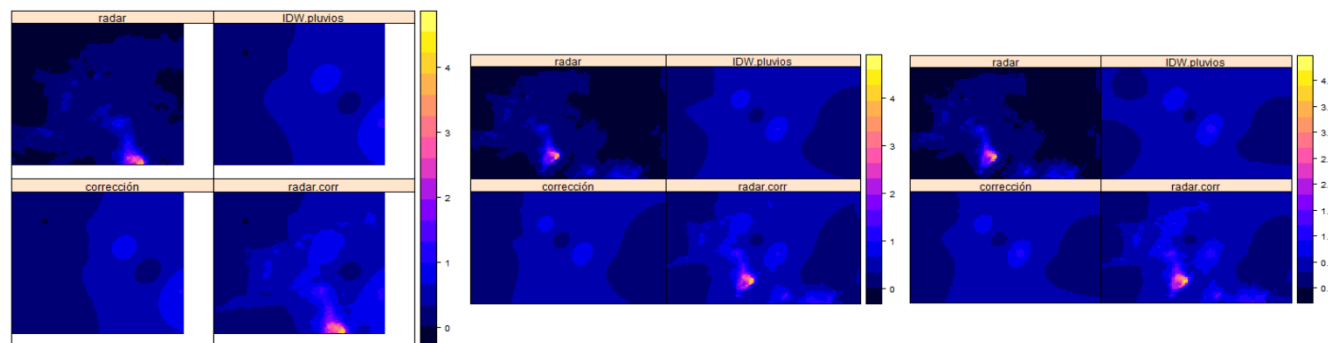




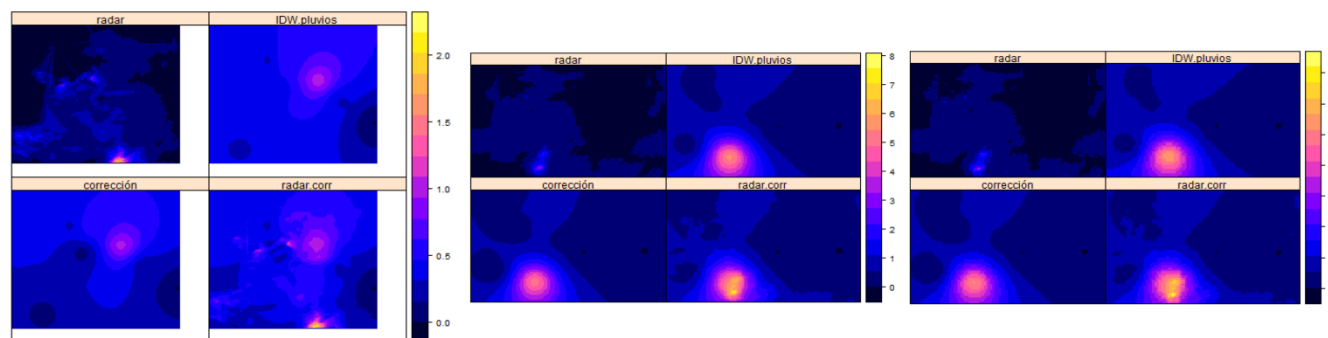
03/05/2015 16:50



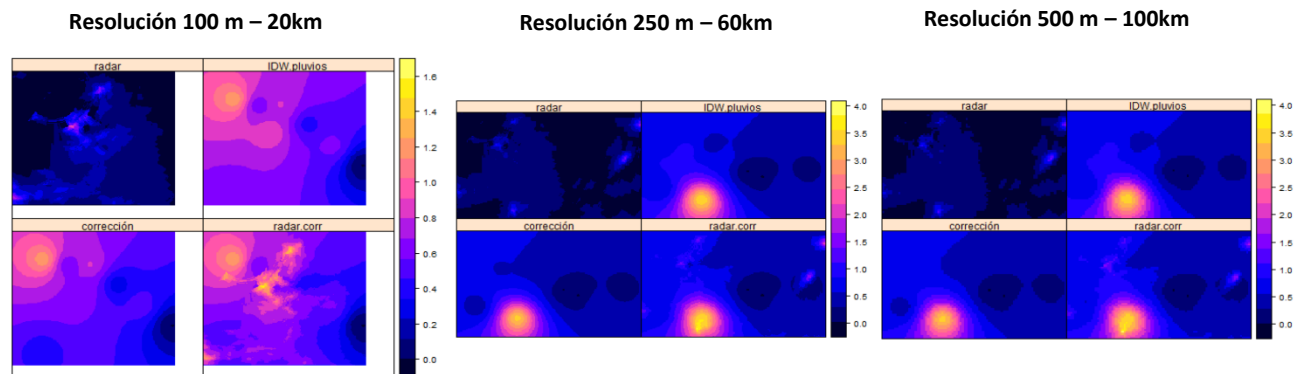
03/05/2015 17:05



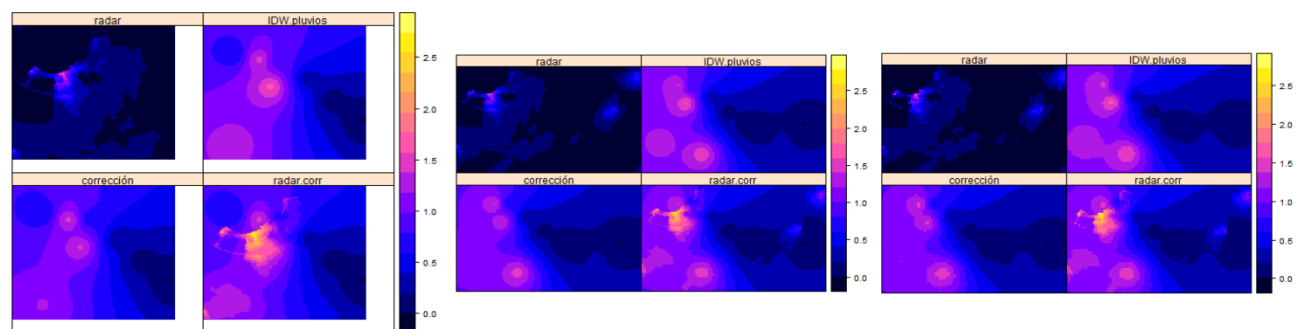
03/05/2015 17:20



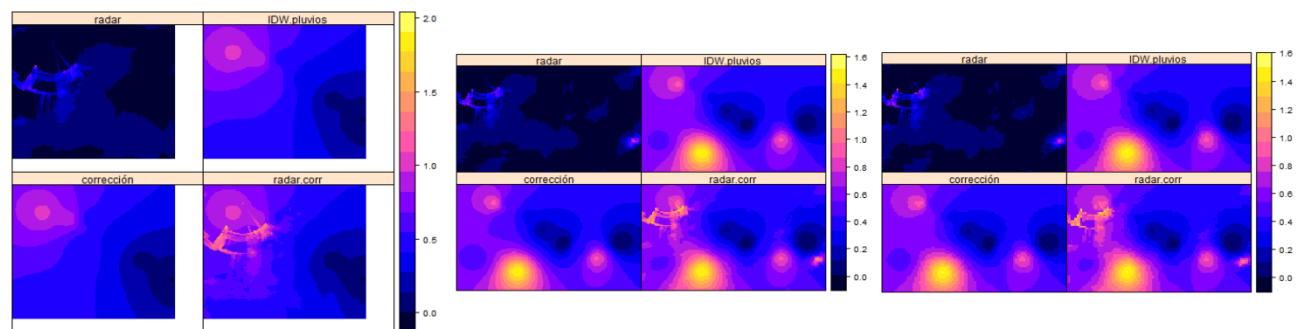
03/05/2015 17:35

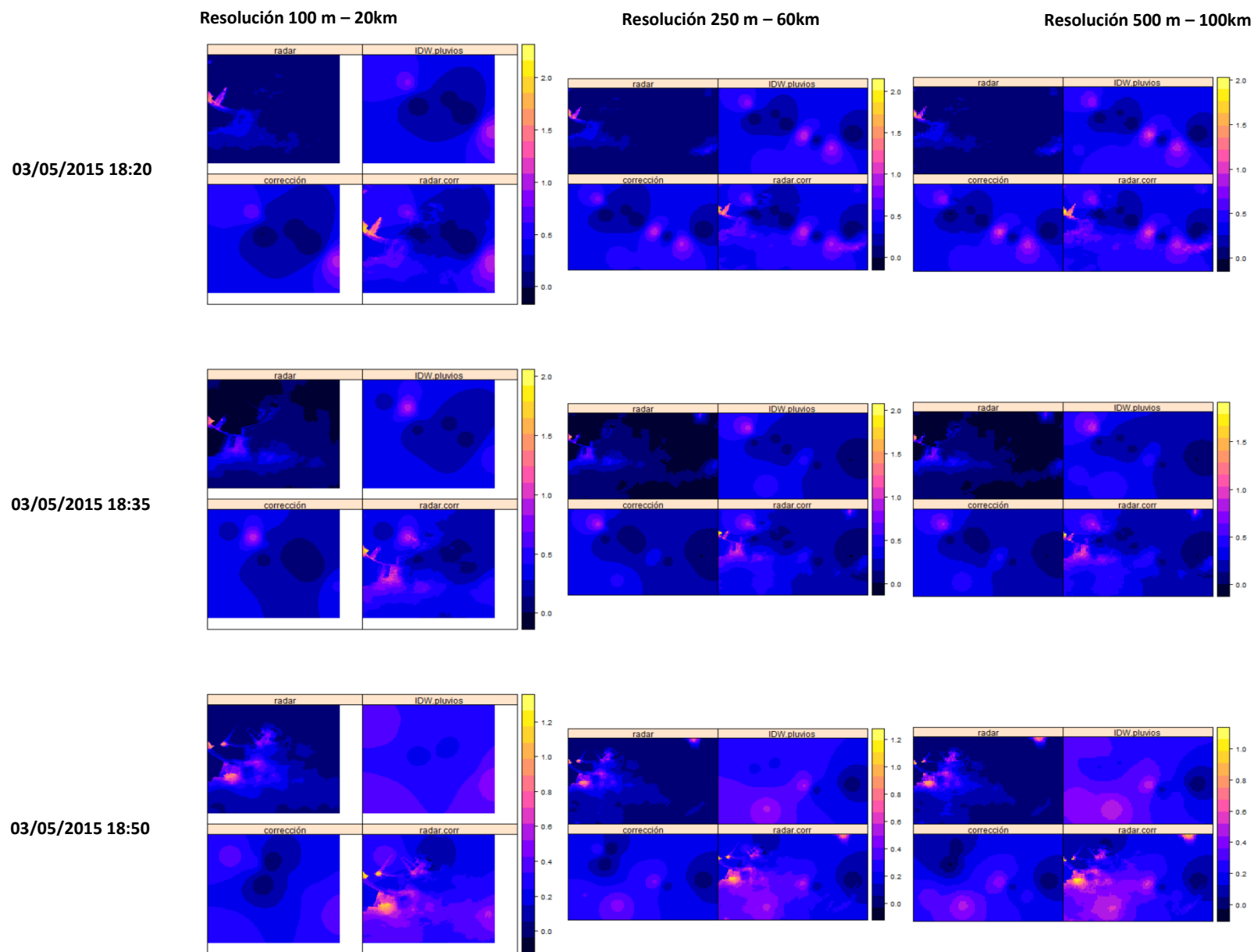


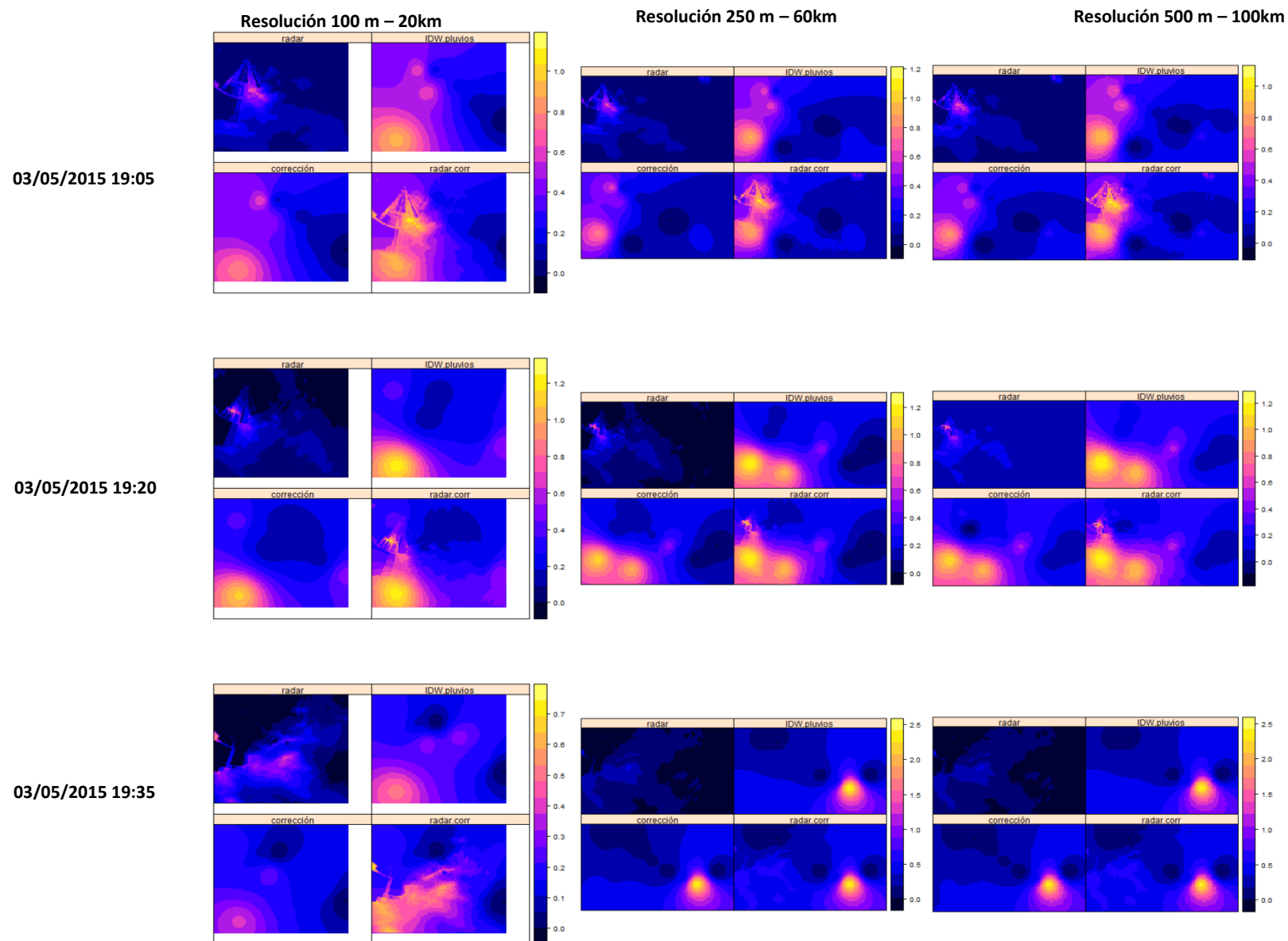
03/05/2015 17:50



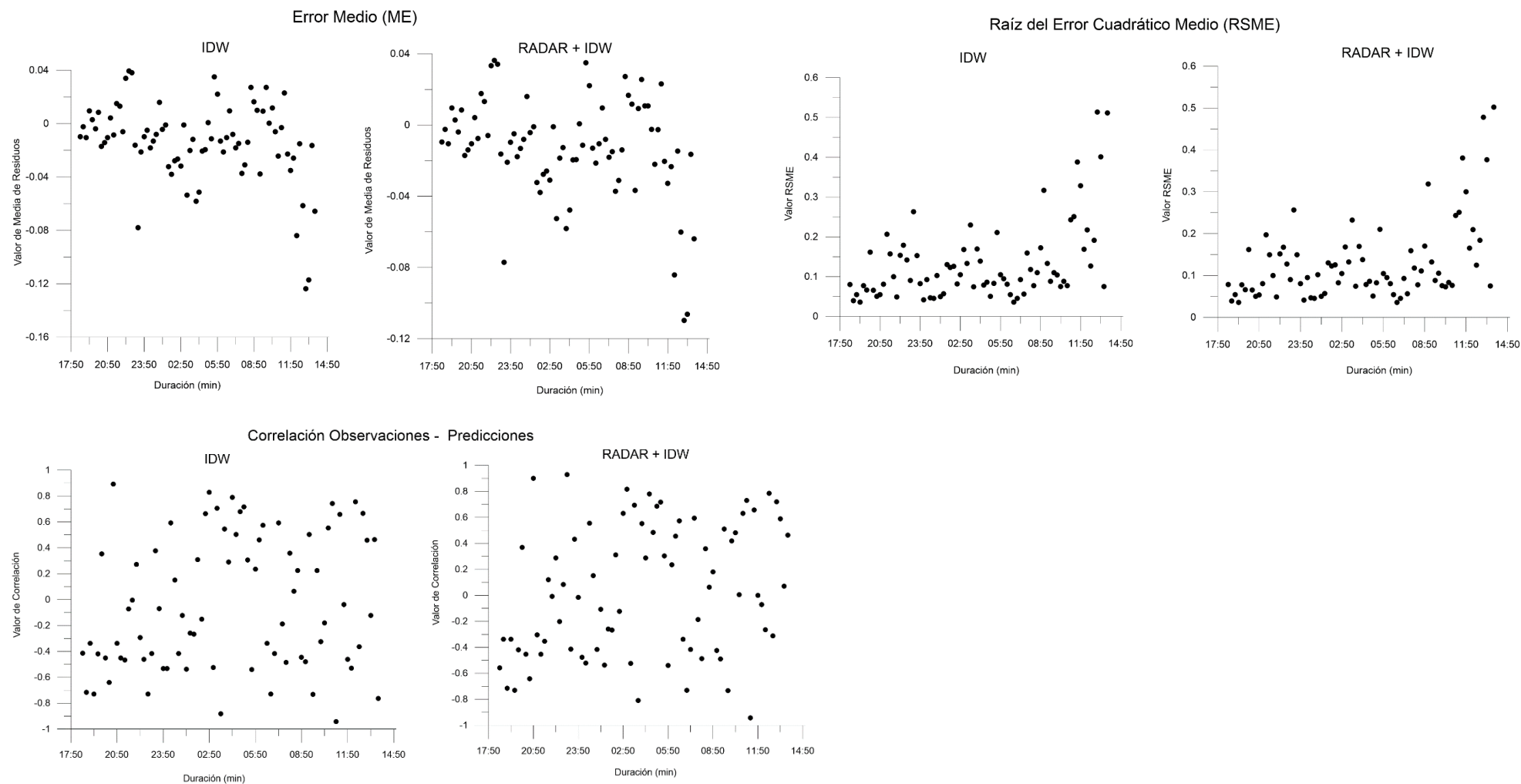
03/05/2015 18:05



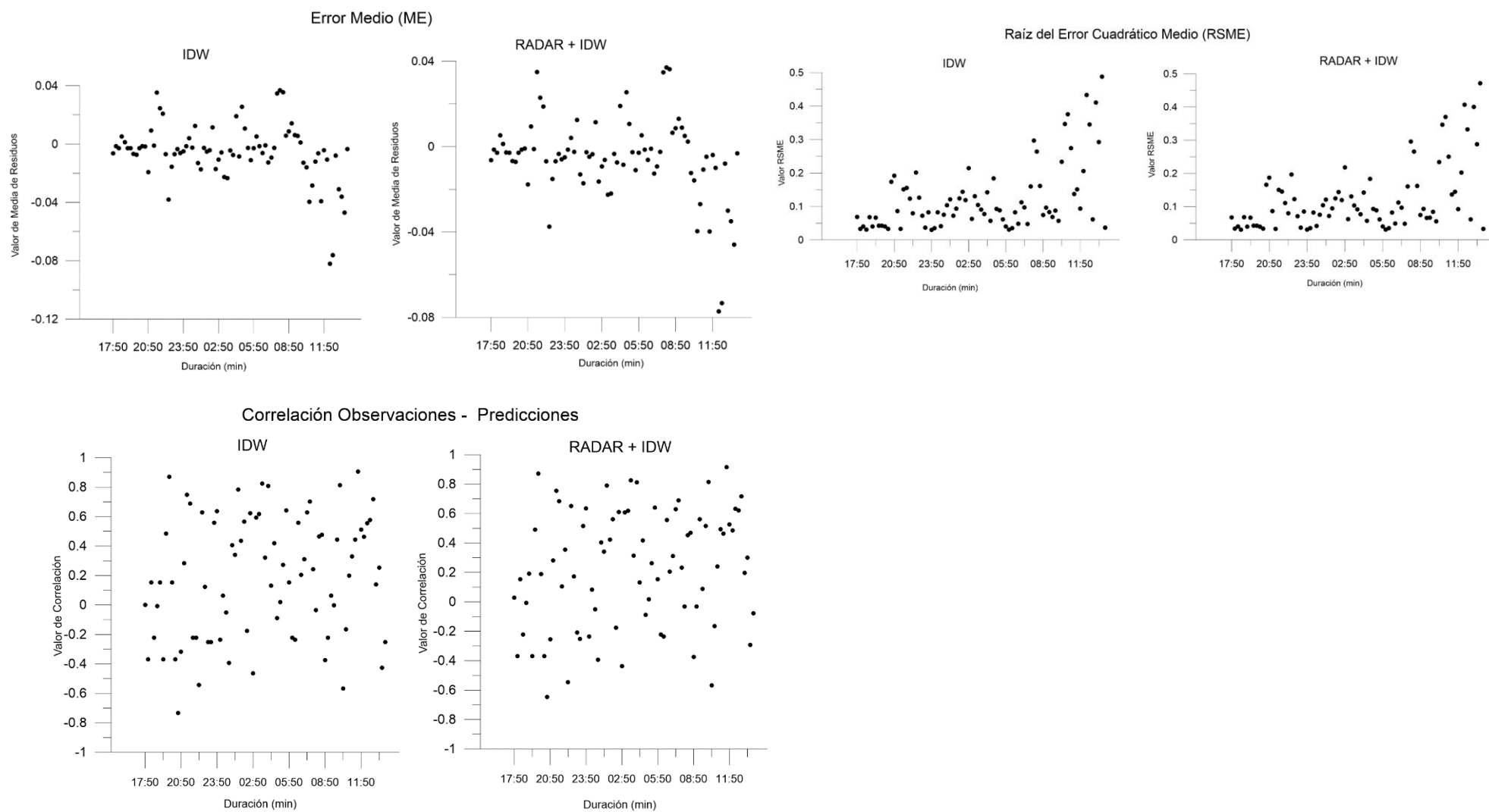




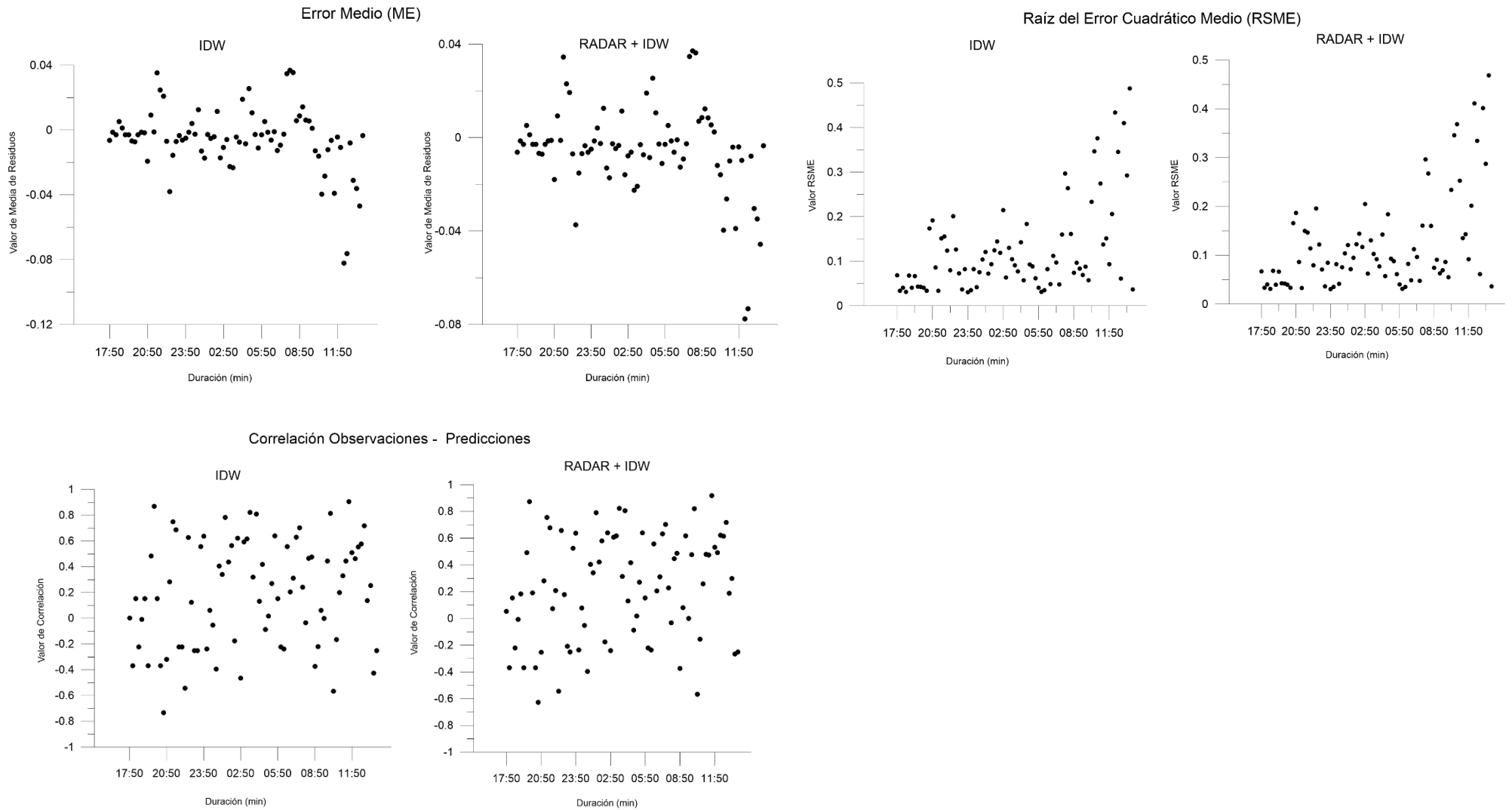
Anexo D: Evento 2 Gráficos de dispersión de los parámetros resultados de validación cruzada en el alcance de 20 km a resolución de 100m.



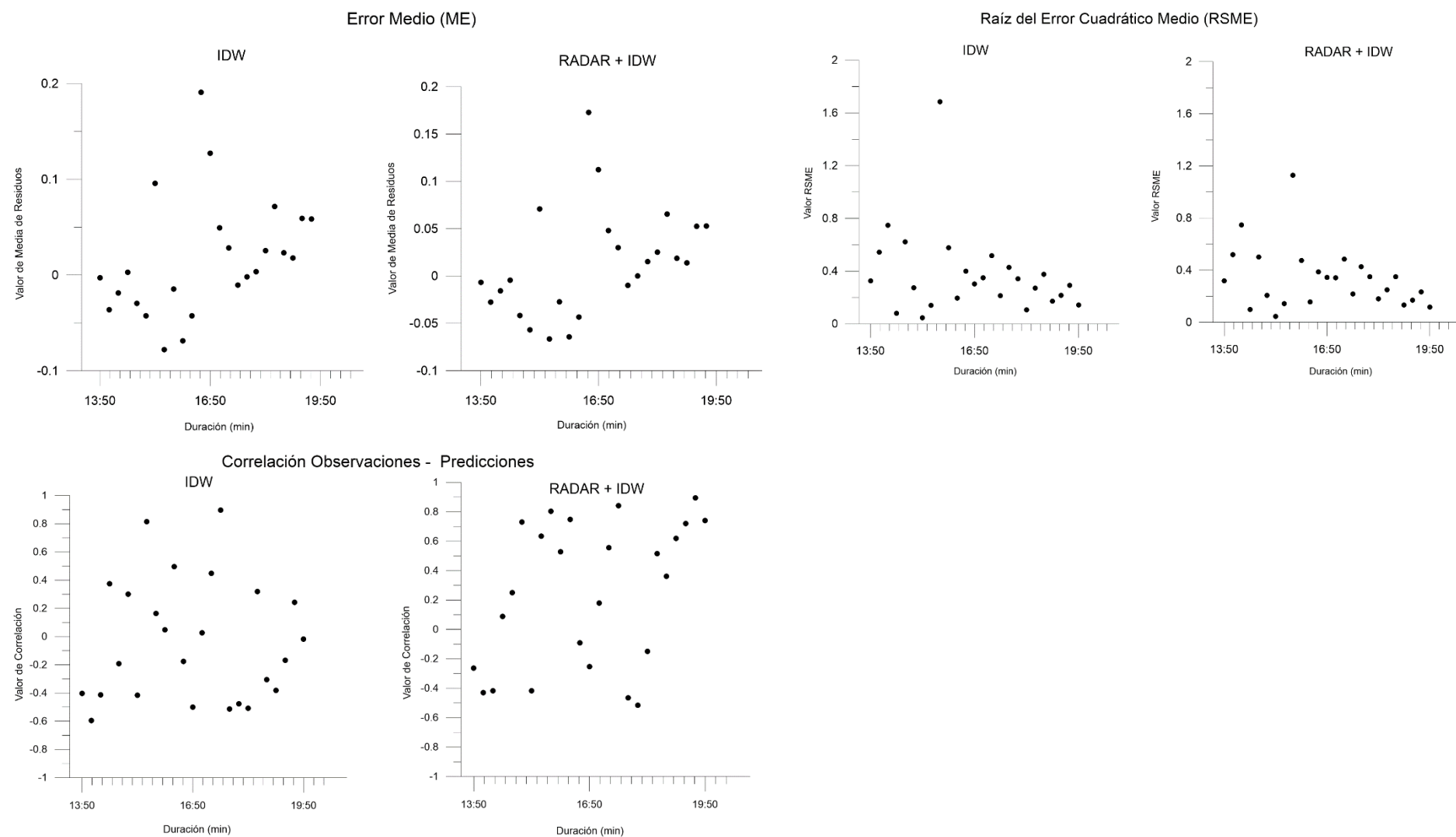
Evento 2 Gráficos de dispersión de los parámetros resultados de validación cruzada en el alcance de 60 km a resolución de 250m.



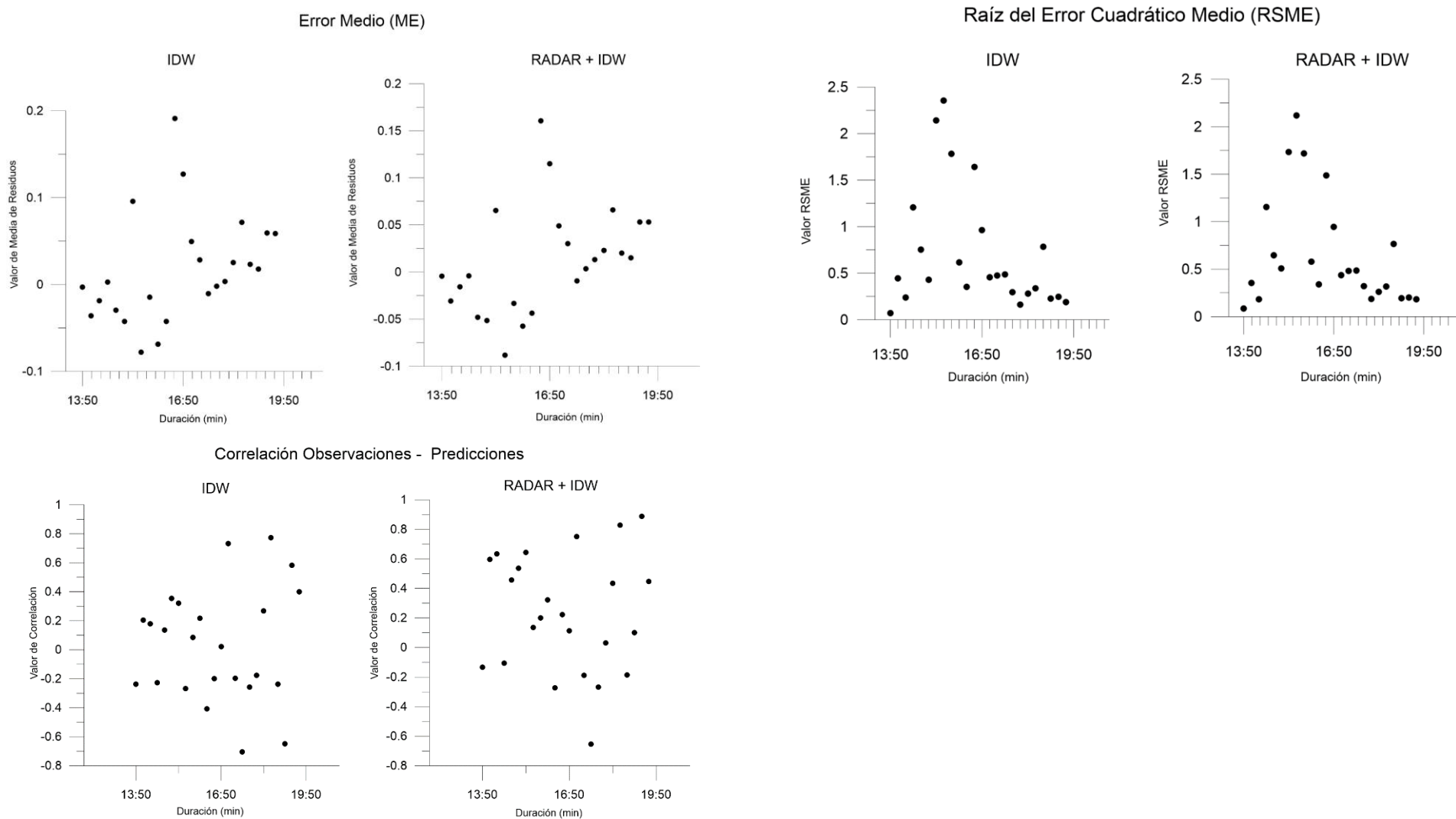
Evento 2: Gráficos de dispersión de los parámetros resultados de validación cruzada en el alcance de 100 km a resolución de 500m



Evento 3: Gráficos de dispersión de los parámetros resultados de validación cruzada en el alcance de 20 km a resolución de 100m



Evento 3: Gráficos de dispersión de los parámetros resultados de validación cruzada en el alcance de 60 km a resolución de 250m



Evento 3: Gráficos de dispersión de los parámetros resultados de validación cruzada en el alcance de 100 km a resolución de 500.

